

Diplomová práce

Analýza problémů plastického toku materiálu při výrobě mosazných
fitinků

Bc. Marek Benč

2021

Marek Benč, Analýza problémů plastického toku materiálu při výrobě mosazných fitinků,

Vedoucí práce: doc. Ing. Radim Kocich, Ph.D.

Abstrakt:

Hlavním cílem této předložené diplomové práce je analýza problémů při plastickém toku materiálu při výrobě mosazných fitinků ze slitiny CuZn40Pb3, které se používají v medicíně jako láhvové uzavírací ventily. S využitím dodané simulace celého procesu výroby fitinků bylo provedeno sledování plastického toku materiálu při třech podmínkách ohřevu za použití indukčního ohřevu. Na základě dodaných vzorků pro experiment byly provedeny jednotlivé dílčí analýzy, které zjišťovaly příčinu defektů.

Klíčová slova: fitinky, CuZn40Pb2, zápusťkové kování, numerické modelování

Marek Benč, Analysis of material plastic flow defects during brass fitting production,

Head leader: doc. Ing. Radim Kocich, Ph.D.

Abstract:

Main objective of this Diploma thesis is to analyse plastic flow of shut-off valves (fittings) for gas bottles used in medical industry. Using the simulation of the entire fitting production process, the plastic flow of the material was monitored under three induction heating conditions. Based on the samples for experimental use, individual partial analyses were performed, which aimed to determine the reasons of the defects.

Keywords: fittings, CuZn40Pb2, closed-die forging, numerical simulation,

OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Teoretický rozbor mosazných fitinků	2
2.1	Hlavní části uzavíracího ventilu	3
2.2	Kombinované integrované ventily	4
3	Charakteristika materiálů v systému Cu-Zn a jejich zpracování	5
3.1	Přísadové prvky v mosazi	6
3.2	Mechanické vlastnosti mosazí	8
3.3	Obecné aspekty tváření mosazí.....	9
3.3.1	Výchozí polotovary	10
3.3.2	Ohřev polotovarů na tvářecí teplotu.....	10
3.4	Zápustkové kování	11
3.4.1	Stroje pro zápustkové kování	12
3.5	Protlačování	15
3.6	Numerické modelování ve tváření	18
3.6.1	Simulační softwary	21
4	Cíle práce	24
5	Experimentální analýza výroby mosazných fitinků.....	25
5.1	Charakteristika výchozího materiálu	25
5.2	Nástin řešeného problému u mosazného fitinku.....	25
5.3	Simulace výroby fitinku.....	26
5.3.1	Analýza plastického toku materiálu	27
6	Diskuse získaných výsledků	34
6.1	Lokalizace trhliny a měření tvrdosti	34
6.2	Optická mikroskopie.....	37
6.3	Transmisní elektronová mikroskopie a EDS analýza	40
6.4	Opotřebení matrice	43
7	Závěr.....	45
	Literatura	46

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Radimovi Kocichovi za veškerou pomoc, užitečné rady, doporučení a čas, které mi věnoval k vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Stanislavu Fejfarovi za poskytnutí důležitých informací pro tuto práci.

1 ÚVOD

Mosazné fitinky patří mezi šroubové spojovací armatury. Některé slouží k řízení objemového průtoku dopravovaného média nebo plynu, jiné zase plní funkce pojistné či regulační. Mosaz je velmi citlivá na teplotní a rychlostní podmínky deformace, které dokážou významně ovlivnit nejen plastické chování, ale i soudržnost materiálu.

Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou GCE s.r.o (Gas Control Equipment) za cílem experimentálně analyzovat problémy vzniklé při výrobě mosazných fitinků zápusťkovým kováním za tepla ze slitiny CuZn40Pb2.

Diplomová práce je rozdělena do dvou částí, teoretická a experimentální. V První části je popsán teoretický rozbor výroby mosazných fitinků, vlastnosti mosazi a využití numerického modelování ve tváření. V experimentální části jsou předloženy problémy, které ovlivňují kvalitu výroby. Jako první z hlediska analýz bylo provedeno sledování plastického toku materiálu za podmínek rozdílné distribuce teplot po průřezu polotovaru. Na základě dodaných vzorků pro experiment byly provedeny další jednotlivé analýzy. Nejprve bylo provedeno měření tvrdosti, za účelem lokalizovat případné defekty, podílející se na vzniku porušení. Následně pak optická mikroskopie a taktéž i elektronová mikroskopie. Optická mikroskopie byla cílena na zachycení plastického toku materiálu při fázi protlačování, zatímco elektronová analýza byla zaměřena především na monitorování samotné trhliny.

2 TEORETICKÝ ROZBOR MOSAZNÝCH FITINKŮ

Dnešní medicínu si lze jen těžko představit bez medicínálních plynů, které jsou používány při záchraně pacienta během operací i následné péče, pro diagnostické účely, ale i pro doplňkovou léčbu. Obor medicínálních plynů prošel za několik desetiletí značným vývojem v oblasti technologie, distribuce i aplikace, s čímž jsou spojeny i vysoké nároky na zařízení a výrobky pro tuto oblast [1].

Nedílnou součástí tlakové lahve pro technické plyny je uzavírací ventil viz **obr. 1**. Ten slouží k plnění a vypouštění obsahu tlakové lahve a musí udržet lahev těsnou, je-li uzavřen. Jeho základní funkcí je rovněž zajistit těsné a bezpečné připojení s plnicí stanicí a také spojení s následujícími vysokotlakými prvky plynového distribučního systému při vyprazdňování lahve. Těmi jsou především lahvové redukční ventily nebo vysokotlaké připojovací hadice či spirály, které se montují k normované přípojce ventilu. Mezi volitelné funkce lahvového ventilu pak lze zařadit možnost udržení zbytkového tlaku v lahvi pomocí tzv. RPV (residual pressure valve), možnost vybavení průtržnou membránou nebo omezovačem průtoku pro havarijní stavy. Nejvyšší užitnou hodnotu pak nabízí tzv. kombinované neboli též integrované ventily, které ve své konstrukci integrují funkce uzavírací armatury a regulátoru tlaku, případně také průtoku. K ochraně uzavíracího nebo kombinovaného ventilu při manipulaci s lahví slouží ochranný klobouček lahve nebo otevřený ochranný třmen [2].



Obr. 1: Medicínální lahvový uzavírací ventily [3]

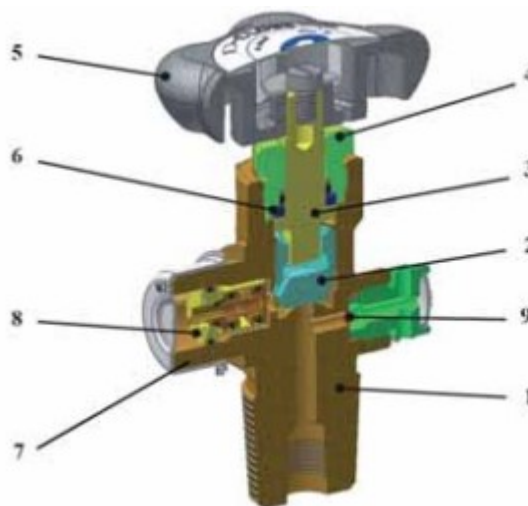
2.1 Hlavní části uzavíracího ventilu

Tělo (1) je nejčastěji vyrobeno z mosazi, pro medicínské aplikace je pochromované viz. **obr. 2**. Základní tvar se získává zápusťkovým kováním za tepla. Další tvarové detaily pak vznikají přesným obráběním na obráběcích centrech. Tělo umožňuje montáž ostatních konstrukčních dílů a vlastní připojení celého uzavíracího ventilu do tlakové lahve. Součástí těla je normované vstupní připojení, nejčastěji závit. Na viditelné části povrchu těla jsou vyraženy nutné identifikační údaje ventilu, jako např. označení výrobce, datum výroby, druh pracovního média, pracovní tlak, použité typy a velikosti závitu apod [2].

Kuželka (2) spolu se sedlem ventilu zajišťuje vnitřní utěsnění uzavírací armatury viz. **obr. 2**. Je vyráběna ze speciálních těsnících materiálů kompatibilních s plyny v lahvích. Po přitlačení na sedlo vytváří těsný spoj a uzavírá průtok plynu [2].

Vřeteno (3) viz. **obr. 2** přenáší rotační pohyb z ovládajícího kolečka na šroub, který spolu s vodící maticí vytvoří potřebný posuvný pohyb [2].

Vodící matice (4) spolu s vřetenem je vidět na **obr. 2**, slouží k převodu rotačního pohybu kolečka na přímočarý pohyb kuželky vůči sedlu [2].



Obr. 2: Schéma uzavíracího ventilu 1tělo, 2kuželka, 3vřeteno ,4vodící matice, 5ovladač, 6 těsnící prvky, 7 přípojka ventilu, 8 ventil RPV, 9průtržný disk [2].

Ovladač (5) umožňuje základní obsluhu uzavíracího ventilu viz. **obr. 2**. Krytka ovladače může svým barevným rozlišením indikovat typ plynu a většinou obsahuje i logo majitele tlakové lahve. Ovladač splňuje ergonomická kritéria a jeho velikostí je definován

utahovací moment ventilu. Je-li ovladač vyroben z plastu, obsahuje vždy ve své konstrukci kovovou část, která samostatně musí zajistit uzavíratelnost ventilu např. dojde-li k požáru a úplnému roztavení plastové části [2].

Těsnící prvky (6) viz. **obr. 2** nepropustně oddělují jednotlivé prostory vnitřní části ventilu. Jsou to zejména O-kroužky ze speciálních materiálů. Ty musí být vždy kompatibilní s aktuálním pracovním médiem [2].

Přípojka ventilu (7) jde vidět na **obr. 2**, slouží k těsnému a bezpečnému spojení s plnicí stanicí nebo s odběrným systémem. Z důvodu zajištění kvalitní a bezpečné funkce jsou jednotlivé ventily konstrukčně různé pro odlišné typy plynů a pro různé plnicí tlaky. Aby nemohlo dojít k záměně, jsou tvar přípojky a její závit definovány normou a liší se dle typu plynu v lahvi a také jsou odlišné pro lahve určené pro 200 barů a 300 barů [2].

Ventil zbytkového tlaku RPV viz. **obr. 2 (8)** je zařízení pro zachování zbytkového tlaku v lahvi při jejím vyprazdňování (cca 4 bary), čímž chrání vnitřní prostor tlakové lahve proti znečištění z vnějšího prostředí a případné korozi. Tím je zvyšována životnost lahve a zajišťována čistota plynu. Zbytkový tlak nepředstavuje pro uživatele lahve ztrátu plynu, nebo jeho velikost je tak nízká, že už lahev stejně nelze pro běžné aplikace využít [2].

Průtržný disk (membrána) viz. **obr. 2 (9)** zajišťuje bezpečné odtlačování lahve v případě, že tlak přesáhne nastavenou bezpečnou hodnotu [2].

2.2 Kombinované integrované ventily

Kombinovaný ventil na **obr. 3** zajišťuje všechny funkce ventilů uzavíracího a redukčního. Jeho předností je, že uživatel nepřichází do styku s médiem za vysokého tlaku, ale vždy jen s tlakem dle nastavení na regulátoru. Tak jako klasické lahvové redukční ventily zajišťuje regulátor kombinovaného ventilu dostupnost média o požadovaných parametrech (vhodný tlak pro kyslík, acetylen, dusík apod. a průtok pro argon a směsi argon/oxid uhličitý). K uživatelskému připojení pak slouží nejčastěji rychlo-spojovací mechanismy nebo klasické nízkotlaké hadicové přípojky. Kombinované ventily se často používají na lahvích s medicínami, především s kyslíkem. Malé lahve s kyslíkem používají záchranáři v sanitkách, lze se s nimi setkat při transportu pacientů a na urgentním příjmu v nemocnicích a také při domácí péči pacientů postižených respiračními nemocemi. Tato vysoce ergonomická zařízení se vyznačují nenáročností obsluhy tak, aby nenarušovala hladký zásah lékaře. Výstupní průtok u těchto ventilů je jednoznačně

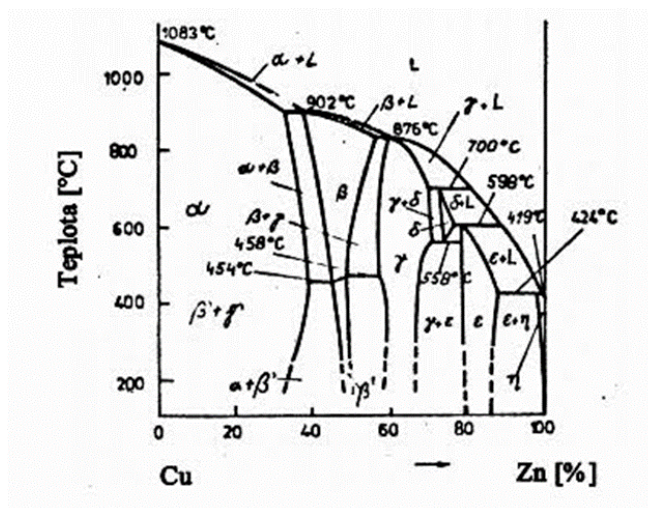
identifikovatelný a je nastavován stupňovitým pootočením ovladače regulačního šroubu regulátoru. S kombinovanými ventily se setkáváme také na palubách letadel pro nouzovou dodávku kyslíku [2].



Obr. 3: Kombinované ventily pro technické a medicínální plyny [1]

3 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ V SYSTÉMU Cu-Zn A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

Mosaz je slitinou mědi a zinku. Vzhledem k široké škále používaných poměrů mědi a zinku a dalších příměsí se i vlastnosti jednotlivých mosazí výrazně liší. Obecně ovšem pro mosaz platí dobrá obrobiteľnosť, odolnosť vŕči korozi, dobrá elektrická a tepelná vodivosť, nemagnetizmus či nízky bod tání. Mosaz se stále běžně využívá v případech, kdy je kladen nárok na nízké tření a výdrž součástí. Mosazi detailně popisuje binární diagram Cu-Zn viz. **obr. 4**. Je to diagram poměrně komplikovaný a obsahuje pět peritektických reakcí, při nichž vznikají intermetalické fáze β , γ , δ , ϵ , η [4, 5].



Obr. 4: Rovnovážný binární diagram Cu-Zn [6]

Praktický význam v něm mají jen fáze α a β a technicky důležité jsou jen mosazi do 50 % Cu. Ostatní fáze jsou křehké a tyto slitiny nelze tvářet. Fáze α je substitučním tuhým roztokem zinku v mědi a má podobné vlastnosti jako měď. Jednofázové slitiny, tvořené tuhým roztokem α mohou obsahovat maximálně asi 39 % Zn (za teplot 454 °C), a toto množství zinku lze při rychlém ochlazení mosazi udržet v metastabilním tuhém roztoku do pokojové teploty. Rovnovážný obsah Zn při pokojové teplotě je 32 %. Intermetalická fáze β je neuspořádanou elektronovou sloučeninou s kubickou prostorově centrovanou mřížkou. V rozmezí teplot 454–468 °C se tato fáze mění na uspořádanou fázi β' . Na rozdíl od poměrně tvárné fáze β je tato uspořádaná fáze β' křehká. Dvoufázové mosazi s obsahem zinku 38 % do 45 % jsou heterogenní a nazývají se $\alpha+\beta$ mosazi. [4, 7, 8].

3.1 Přísadové prvky v mosazi

Legované mosazi kromě zinku a mědi obsahují i přísady jiných prvků jako jsou Fe, Al, Mn, Ni, Sn, Si apod. Používají se především tam, kde jsou jednoduché mosazi kvůli svým mechanickým vlastnostem nedostatečné. Jsou to mosazi pro tváření nebo pro odlitky [9].

Cínové mosazi

Mosazi s 0,5 až 1,5 % příměsí cínu se vyznačují kvalitní korozní odolností proti účinkům slané mořské vody. Proto se z nich vyrábějí součásti lodních zařízení. Dále jsou

proslulé velmi dobrými akustickými vlastnostmi, čehož se využívá při výrobě žesťových nástrojů [9, 10].

Niklové mosazi

Niklové mosazi jsou historicky jednou z nejstarších slitin mosazi. Obsahují zhruba 60 % mědi a 14 až 18 % niklu. Nikl je ovšem drahý prvek, norma ČSN EN uvádí mosazi legované niklem jen do 6 % obsahu. Mají světlou až bílou barvu. Díky své pevnosti a odolnosti vůči korozi se z ní vyrábějí lékařské nástroje a pružiny, nebo i postříbřené jídelní přístroje. Pokud se tyto slitiny vyžihají, jsou zvláště vhodné pro hluboké tažení. Několik specifických složení má svůj název. Například slitina CuNi12Zn24 se nazývá pakfong nebo alpaka. Z této slitiny se dříve vyráběly ozdobné nádoby, které svým vzhledem napodobovaly nádoby stříbrné [9, 10].

Hliníkové mosazi

Hliníkové mosazi zpravidla obsahují 3 až 3,5 % hliníku. Přítomnost hliníku v mosazi zjemňuje zrno a zvyšuje pevnost. Daní za to jsou však zhoršené slévárenské vlastnosti. Díky odolnosti vůči korozi se používají pro armatury, ventilová sedla, kondenzátorové trubky, ozubená kola a jiné nadměrně silně namáhané díly [9].

Křemíkové mosazi

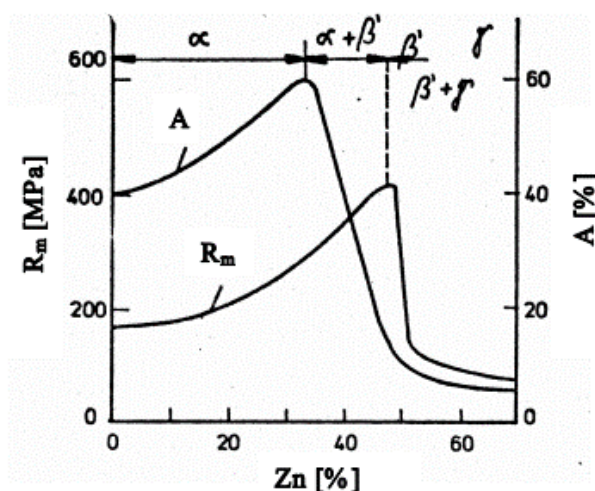
Kvůli tomu, že křemíkové legury zužují oblast fáze α , používají se zásadně na tombaky. Obsah Si bývá jen málokdy vyšší než 5 %. Charakteristickými vlastnostmi křemíkových mosazí je dobrá tvárnost zastudena i zatepla a odolnost proti korozi. Jsou vhodné převážně k odlévání armatur a jiných součástí, které jsou v provozu při nezvýšených teplotách nuceny odolávat účinkům agresivních solných roztoků, mořské vody a solným alkáliím (kromě amoniaku). V neposlední řadě se používají i jako pájky na ocel [9, 10].

Manganové mosazi

Manganové mosazi mají dobré antikorozní a mechanické vlastnosti, díky kterým se z nich vyrábějí součásti zámořských lodí, především pak lodní šrouby. Zároveň se ale používají i k výrobě součástí zbraní, turbínových lopatek a armatur pro nejvyšší tlaky [9].

3.2 Mechanické vlastnosti mosazí

Mechanické vlastnosti mosazí závisí na množství zinku ve slitině, ale mohou být užitečně upravené přidáním legujících prvků za účelem zlepšení pevnosti, obrobitelnosti nebo odolnosti proti korozi. S rostoucím obsahem zinku se zlepšuje zpracovatelnost za tepla (válcování lisování, kování apod.), ale klesá možnost tváření za studena tyto mosazí se nejběžněji používají na výkovky, přičemž mají menší citlivost na obsah nečistot. Nevýhodou dvoufázových mosazí je náchylnost ke korozi a napětí. Vliv množství zinku na mechanické vlastnosti mosazí, je znázorněn na **obr. 5**. Pokud je slitina jednofázová (tuhý roztok α), tažnost je vysoká a maxima dosahují slitiny s cca 32 % Zn. Mosazí α vykazují v rozmezí teplot 300 až 700 °C pokles tvárnosti. Proto obvykle bývají tvářeny za studena. Slitiny s vyšším obsahem zinku, slitiny heterogenní mají ve struktuře kromě α zrn fázi β (uspořádaný tuhý roztok). Při ohřevu heterogenní mosazí se tato tvrdá a křehká fáze mění ve fázi β' (neuspořádaný tuhý roztok) s lepší tvárností, takže heterogenní mosazí lze tvářet za teplot okolo 700 °C. U slitin s vyšším obsahem zinku nad 38 % se ve struktuře objevuje fáze β' , která způsobuje snížení tažnosti. Mosazí $\alpha+\beta$ se proto mohou tvářet pouze za tepla v oblasti stability neuspořádané fáze β . Výskyt fáze γ ve struktuře vede k naprosté ztrátě houževnatosti slitiny, proto jsou mosazí tvořeny $\beta'+\gamma$ v praxi nepoužitelné. Pevnost roste až do obsahu asi 45 % Zn, kdy fáze β' již převládá. Další zvýšení jejího objemu má za následek vymizení tvárné fáze α , a tedy prudký pokles pevnosti mosazí. Proto se měď tváří buďto za studena, nebo při teplotách kolem 800 °C. S rostoucí teplotou klesá mírně pevnost, ale zmenšuje se tvárnost. Tvrdost mosazí roste s rostoucím obsahem zinku [10, 11].



Obr. 5: Vliv Zn na mechanické vlastnosti mosazí [6]

3.3 Obecné aspekty tváření mosazí

Mosazi pro tváření obsahují od 5 do 42 % Zn, mohou tedy být homogenní i heterogenní. Jsou zařazeny v materiálových listech ČSN 42 32 xx. Kromě označení číslem se používá také označení Ms doplněnou číslicí, která udává obsah mědi např. Ms63 značí slitinu která je složena ze 63 % Cu a 37 % Zn. Tato slitina je dobře tvářitelná za studena. Mosazi s vyšším obsahem mědi, než je 80 % se nazývají tombaky. Tombaky mají dobrou odolnost proti korozi a velmi dobrou tvárnost. Mosazi s obsahem mědi 68 až 70 % mají nejlepší tvárnost, proto se používají k hlubokému tažení nábojnic, hudebních nástrojů atd. Mosazi obsahující 20 až 40 % Zn tvářené za studena jsou náchylné ke korozi ve vlhké atmosféře při spolupůsobení vnitřního pnutí. Mosazi s obsahem mědi 58 % a přísadou olova jsou tzv. automatové mosazi. Tyto mosazi mají díky přidanému olovu lepší obrobiteľnost. Mosazi ke tváření podle norem jsou uvedeny v **tab. 1** [12].

Tab. 1: Mosazi ke tváření

Slitina ČSN	Hmotnostní koncentrace [%]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Mez kluzu Re [MPa]	Tažnost A [%]
Ms96 42 3200	95-97	392	-	2
Ms90 42 3201	88-91	245	78	40
Ms85 42 3202	84-86	265	118	40
Ms80 42 3203	79-81	265	128	40
Ms70 42 3210	69-72	275	128	47
Ms68 423212	67-70	294	118	42
Ms63 423213	62-65	284	118	40
Ms60 42 3220	59-62	334	196	30
Ms58 Pb	56-59	336	118	20

3.3.1 Výchozí polotovary

Výchozím polotovarem pro výrobu zápusťkovým kovááním bývají vesměs válcované nebo tažené tyče a dráty za tepla kruhového nebo čtvercového průřezu. Výchozí polotovary se dělí na kratší vsázkové polotovary (špalky, přířezy, nápichy). Jejich hmotnost odpovídá hmotnosti výchozího polotovaru pro daný výkovek. Pro jejich dělení se používají operace jako řezání, stříhání a lámání [13].

Mosazné sochory kruhového průřezu na **obr. 6** se vyrábějí od průměru 2 mm až do průměru 300 mm. Standartní výrobní délka je 3000 mm, nicméně pro samotnou výrobu fitinků jsou sochory děleny na pilách na finální délku. Mosazné tyče jsou polotovary, které jsou určeny pro další zpracování v závodech na výrobu armatur. Nejvýznamnější skupinu tvoří olovnaté mosazné tyče (CuZn40Pb2 , CuZn38Pb1 , CuZn39Pb3), z nichž jsou vyráběny průmyslové armatury, šrouby a jiné produkty vyráběné sériově. Část mosazných tyčí je zpracována kovááním za tepla a druhá část je zpracována třískovým obráběním na hotové součástky s využitím CNC obráběcích centrech. Menší část tvoří hlubokotažné mosazi typu CuZn30 . Výroba mosazných tyčí probíhá protlačováním za tepla s následným tažením za studena a kalibrováním na požadovaný rozměr polotovaru [14, 15, 16, 17].



Obr. 6: Mosazné kruhové tyče [18]

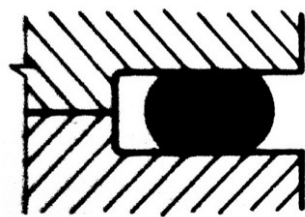
3.3.2 Ohřev polotovarů na tvářecí teplotu

Z ekonomických i technických důvodů se v dnešní době preferuje indukční ohřev polotovarů před samotným tvářením. Jeho princip spočívá v průchodu střídavého elektrického proudu vodičem, kolem kterého se vytváří magnetické pole, které mění svou velikost a směr. Jestliže se do magnetického pole vloží kovové těleso, indukuje se v něm

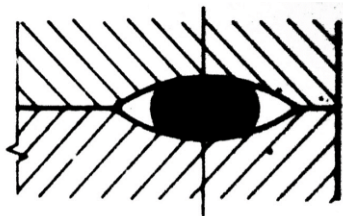
elektromotorická síla, jejímž působením začne tělesem procházet elektrický proud a těleso se zahřívá. Právě na tomto principu je založen nejrychlejší způsob ohřevu (indukční ohřev), který je vhodný pro rychlé ohřátí materiálu a velkou sériovou výrobu, což se uplatňuje i při výrobě mosazných fitinků. Před kovááním jsou nařezané špalky ohřívány v indukční peci o výkonu 500 kW na teplotu 700 °C během několik sekund. Teplota na výstupu je měřena pyrometrem [12].

3.4 Zápustkové kování

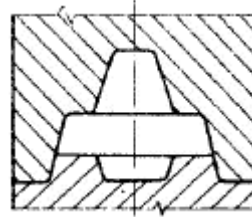
Zápustkové kování se vyznačuje malým počtem operací (ohřev, kování, úprava výkovku) a velmi krátkým pracovním časem. Při uplatnění indukčního ohřevu trvá ohřev desítky sekund a styk nástroje s tvářeným kovem zlomky sekund. Mnohem delší jsou časy nepracovní, především manipulační, které lze zkrátit mechanizací, automatizací. Tyto pracoviště jsou specializované na jeden druh výkovku, jako např. (zalomené hřídele, ojnice, šrouby, fitinky, ozubená kola, které se kovou na vysoce výkonných, plně automatizovaných výrobních linkách. Tvarově jednoduché výkovky se mohou vykovat z výchozího polotovaru v jediné zápustkové dutině. Tvarově složitější výkovky se kovou z vhodně připraveného předkovku, který se zhotovuje volným kovááním, na kovacíh válcích nebo postupovým kovááním v přípravných a dokončovacích dutinách jediné zápustky příslušného tvářecího stroje. Přípravné zápustkové dutiny se vyznačují tím, že nejsou nikdy zcela zaplněny tvářeným kovem. Dělí se na otevřené (s neomezeným šířením kovu) viz. **obr. 7a** a uzavřené (s omezeným šířením kovu) viz. **obr. 7b**. Jakýkoliv přebytek kovu v těchto dutinách vede k vzniku výronku, který jednak znemožňuje úplné semknutí zápustky, jednak se v dokončovacích dutinách změni v nežádoucí přeložku. Oproti tomu dokončovací dutiny se kovem dokonale zaplňují (uzavřené dutiny) viz. **obr. 7a** nebo, a to častěji se kovem mírně přeplňují (otevřené dutiny) viz. **obr. 7b**, přičemž se přebytečný kov vytlačuje v dělicí rovině výkovku do výronkové drážky, kde tak vzniká výronek, který se odšťihuje na ostřihovacím nástroji [19, 20].



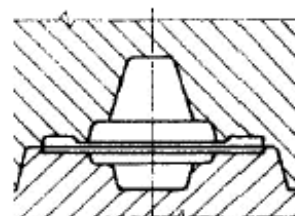
a) otevřené



b) uzavřené

Obr. 7: Přípravné dutiny [19]

a) otevřené



b) uzavřené

Obr. 7: Dokončovací dutiny [19]

Výroba mosazných plynových ventilů je prováděna zápustkovým kováním za tepla. Konvenční hydraulický lis disponuje o síle 150 tun. Jednotlivé fitinky jsou tvářeny jedním úderem v čase 4 s. Před kováním se matrice zahřívají na určitou teplotu za účelem správného toku kovu. Nařezané špalky mosazného sochoru putují na pásovém dopravníku do indukční pece, kde se ohřejí na teplotu 700 °C. Teplota je kontrolována na výstupu pyrometrem. Následně ohřátý špalek je automatizovaně vložen do spodní části zápustky, kde je stlačen vlivem působící síly dosedající horní zápustky. Krátce po dosednutí zápustek k sobě a dokončení stlačení výkovku proběhne, také protlačování bočními písty, kterými se vytvoří finální tvar. Po dokování je horký fitinek vyhozen vyhazovačem a putuje po dopravníku do chladicího boxu, kde může chladnout až několik hodin. Před následujícím cyklem jsou zápustky mazány mazivem na bázi grafitu. Další operace pro dokončení fitinku je obrábění a povrchová úprava (zinkování).

3.4.1 Stroje pro zápustkové kování

Buchary

Zápustkové kování na bucharech viz **obr. 8** se vyznačuje vysokou rychlostí úderu beranu a postupným zaplňováním zápustkové dutiny tvářeným kovem v několika po sobě následujících úderech. Buchary najdou své uplatnění v malosériové a středně sériové výrobě při kování tvarově různorodých výkovků. Kove se zásadně v otevřených dutinách.

Padací buchary jsou jednoduché tvářecí stroje. Beran je zvednut do určité výšky a po uvolnění padá vlastní vahou na kovadlinu. Rychlost pádu beranu je přibližně kolem 6 m/s. Buchary dělíme na řemenové a prknové. Řemenové buchary mají beran zvedaný řemenem, který je poháněn elektromotorem. Řemenice unáší kladičkou přitlačovaný řemen, který zvedne beran. Po povolení přitlačné kladky padá. Prknové padací buchary zvedají beran prknem, které je svíráno mezi dvěma kladkami, poháněnými řemeny od dvou elektromotorů. Kladky jsou přitlačovány k prknu pákovým mechanismem [21].



Obr. 8: Buchar [22]

Vřetenové lisy

Vřetenové lisy viz. **obr. 9** jsou jednoduché univerzální tvářecí stroje s převodem síly od pohonu vřetenem na beran. Jejich přednosti se oceňují zejména v malosériové výrobě s pestrým a proměnlivým výrobním programem, kde nahrazují řadu jiných, vesměs jednoúčelových tvářecích strojů. Disponují deformační silou až 25 MN. Používají se ke kování v otevřených a uzavřených zápustkách. Vřetenové lisy se vyznačují dlouhým zdvihem, málo tuhým vedením smýkadla a vyhazovačem v dolním díle zápustky, někdy i v horním díle zápustky. Lisy nejsou vhodné pro postupové kování a pro kování tvarově členitých výkovků. Dvoukotoučový vřetenový lis je poháněn elektromotorem přes řemeny dvou kotoučů na hřídeli, který je osově přesouvá pákovým mechanismem a přitlačuje střídavě jeden nebo druhý kotouč [21].



Obr. 9: Vřetenový lis [23]

Hydraulické lisy

Hydraulická je zobrazen na **obr. 10** Jejich výhodou je klidný, bez rázový chod, možnost lisovat nebo protlačovat plyným tlakem na dlouhé dráze a nemožnost přetížení. Hydraulické lisy se využívají pro přesné kování tvarově složitých výkovků v uzavřených zápustkách, kování velkorozměrových výkovků, kování obtížně tvářitelných slitin [21].



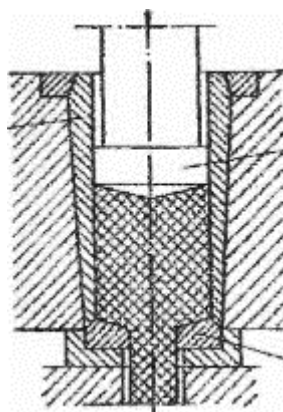
Obr. 10: Hydraulický lis Šmeral o síle 3200 kN [24]

3.5 Protlačování

Protlačování je jednou z nejuniverzálnějších metod pro zpracování všech druhů materiálů, neboť napjatost v tvářeném materiálu je trojosá neboli všestranně tlaková. Protlačování je možné realizovat ve velkém rozmezí teplot. Protlačováním se vyrábějí jak polotovary, určené pro další zpracování nebo hotové výrobky, jakými jsou např. tenkostěnné profily. Protlačování má široké použití při výrobě zejména takových profilů, které nelze vzhledem ke své složitosti průřezu zpracovat jinými procesy za tepla např. válcováním, tažením nebo zakružováním. Proces protlačování také umožňuje vyrábět polotovary na bázi práškové metalurgie. Tato technologie je velmi rozšířena při tváření neželezných kovů ale i pro zpracování ocelí a těžko tváritelných slitin. V technologické praxi se používají dva základní způsoby průtlačného lisování kovů dopředně protlačování a zpětné protlačování. Ale používá se i kombinace obou způsobů [25, 26].

Dopředné protlačování

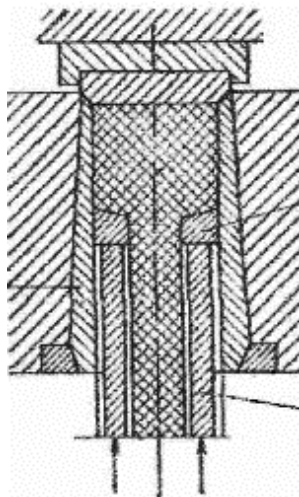
Princip protlačování plných tyčí vidíme na **obr. 11**. Protlačovaný materiál kruhového průřezu, vložený do průtlačnice je protlačován průtlačníkem. nejdříve se napěchuje tak, aby průtlačníci zcela vyplnil. Při dalším pohybu průtlačníku je kov vystaven všestrannému tlaku s největší napětíovou tlakovou složkou v osovém směru, uvede se do plastického stavu a je vytlačován otvorem matrice jako plná profilová tyč ve směru pohybu průtlačníku [27].



Obr. 11: Schéma dopředného protlačování [27]

Zpětné protlačování

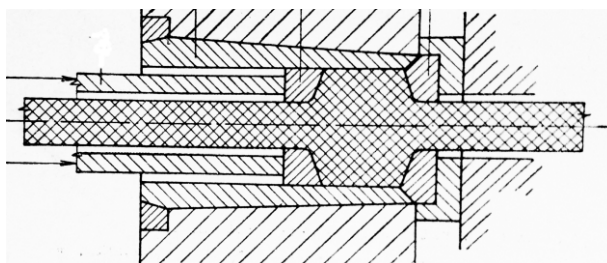
Princip zpětného protlačování je zobrazen na **obr. 12**. Tímto procesem se protlačují plné tyče. Výchozí materiál kruhového průřezu je vložený do průtlačnice a je vystaven tlaku od průtlačníku, který působí na pohyblivou matici. Tímto tlakem se kov vytlačuje maticí proti směru pohybu průtlačníku [27].



Obr. 12: Schéma zpětného protlačování [27]

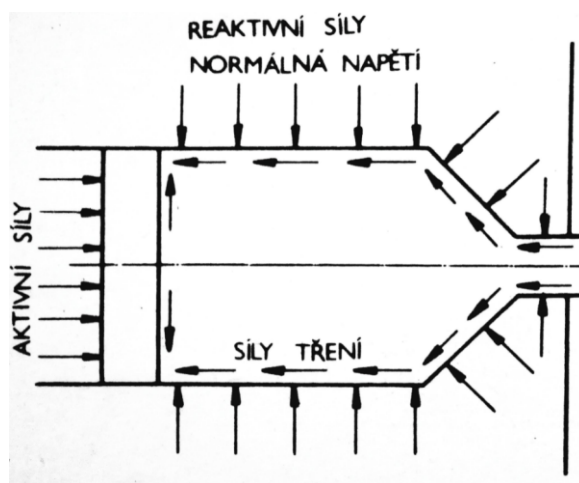
Kombinované protlačování

Výchozí materiál je v průtlačnici vystaven tlaku dutého průtlačníku prostřednictvím pohyblivé matrice. Na druhé straně je průtlačnice uzavřena pevnou maticí. Materiál se vyvozeným tlakem vytlačuje současně oběma maticemi. Princip sdruženého protlačování znázorňuje **obr. 13** [27].



Obr.13: Kombinované protlačování [27]

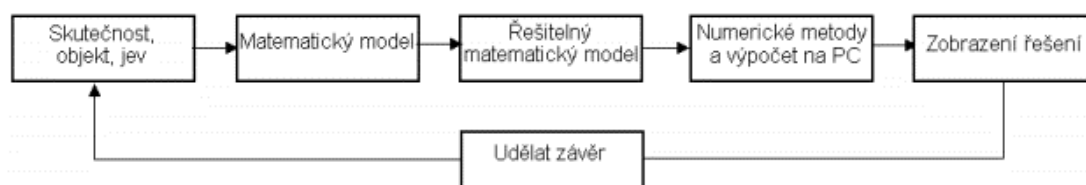
Protlačování kovů a slitin se provádí převážně za tepla. Teplota kovu při protlačování a rychlost toku kovu z matrice jsou hlavními technologickými faktory procesu protlačování, které určují kvalitu vylisku. Teplota kovu při protlačování má být tak vysoká, aby kov v pásnu deformace, a zvláště na jeho stykových plochách vykazoval maximální tvařitelnost. Charakter toku kovu při protlačování se značně mění mezi počátkem a koncem. Je to způsobeno tím, že se v průběhu protlačování značně mění poměr mezi průměrem a délkou čepu, rozložení sil v pásnu deformace a teplota čepu. Průběh sil a charakter toku kovu je znázorněn na **obr. 14**. Aktivní síly jsou na kov přenášeny lisovacím pístem. Kolmo na válcový povrch materiálu a kuželovou i válcovou část matrice působí reaktivní normálová napětí. Na stykových plochách lisovaného kovu a pracovních nástrojů působí směrem proti pohybu částic kovu třecí síly. Výsledkem takového sílového působení je trojosý stav napjatosti se třemi tlakovými složkami. S ohledem na osovou symetrii jsou radiální a obvodová napětí v pásnu deformace stejně veliká a absolutně větší než třetí tlakové napětí působící ve směru osy vylisku. Stav deformace je určen dvěma tlakovými složkami stejně velkými a jednou složkou tahovou [28].



Obr. 14: Schéma sil působících na kov při protlačování [28]

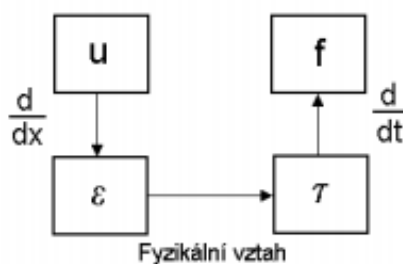
3.6 Numerické modelování ve tváření

Existují dva základní způsoby modelování ve tváření modelování experimentální, které však není možno uskutečnit vždy a modelování teoretické, které zpravidla vyžaduje jisté zjednodušující předpoklady. Teoretické modelování lze provádět dvěma způsoby: analyticky (řešení je přesné, ale je dosažitelné jen pro nejjednodušší úlohy) nebo numericky (přibližně) s využitím výpočetní techniky (tento způsob je označován jako matematické modelování). Základní postup při matematickém modelování ukázán na **obr. 15** [29].



Obr. 15: Postup při matematickém modelování [29]

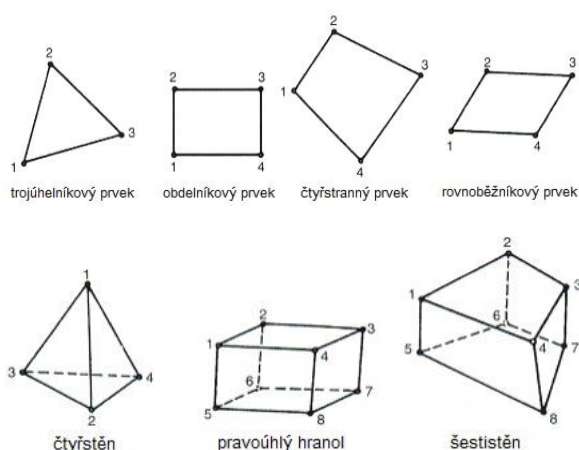
Matematický model obvykle reprezentují diferenciální rovnice. Jde v něm o definování důležitých veličin a jejich vzájemných vztahů. Obecně lze vzájemné vazby mezi veličinami popsat jako na **obr. 16**, kde u je neznámá např. (teplota; posunutí), ε (teplotní spád, deformace), τ (tepelný tok, Fourierův zákon, napětí, Hookův zákon pro pružné deformace, f symbolizuje vnitřní zdroje (vnitřní zdroj tepla, gravitační síla) [29].



Obr. 16: Vazby mezi veličinami obecného matematického modelu [29]

Metoda konečných prvků

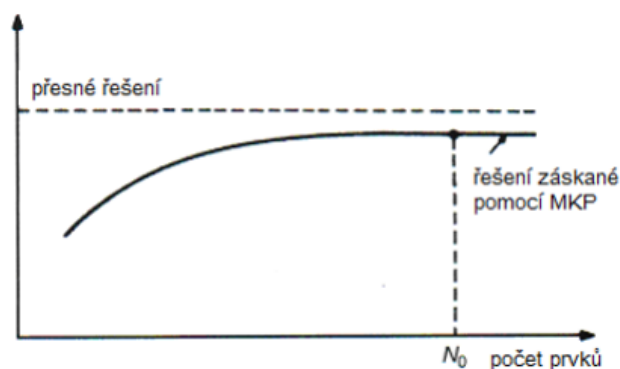
Metoda konečných prvků je numerická metoda na níž je založena většina simulačních programů dneška, patří mezi tzv. metody variační. Tyto metody vznikly v polovině 20. století objevem tzv. Dirichletova principu pro řešení diferenciálních rovnic. Princip spočívá v tom, že k jednotlivým typům diferenciálních rovnic lze sestavit tzv. Dirichletův integrál, jehož minimalizace je řešením dané rovnice. MKP je možno použít v různých inženýrských oblastech. Složitý model analyzovaný metodou je rozdělen na konečné množství prvků s jednoduchou geometrií, na kterých je možno spočítat snadno požadované veličiny. Výsledky na jednom prvku se pak stanou vstupem pro sousední prvky, a tak jsou spočteny hledané veličiny na celém modelu. Vliv na přesnost výpočtu má hustota síť a velikost prvků. Základní prvky pro 2D a 3D modely jsou zobrazeny na **obr.17**. Tvar, velikost i počet prvků je třeba pečlivě vybírat tak, aby původní oblast byla rozdělena co nejlépe, tzn. aby nasíťovaná oblast byla co nejpodobnější originálnímu modelu. Pokud je velikost elementů malá, pak je očekáváno přesnější řešení. Menší velikost však znamená navýšení výpočtového času. Ideálním tvarem je z tohoto hlediska v prostoru krychle, v rovině pak čtverec, případně rovnostranný trojúhelník. Při generování sítě je přiblížení prvků k ideálnímu tvaru hodnoceno prostřednictvím velikostí vnitřních úhlů, které svírají strany resp. stěny prvků nebo pomocí poměru mezi plochou a obvodem. [29, 30].



Obr. 17: Příklad 2D a 3D prvků [29]

Diskretizace

Základním krokem metody konečných prvků je rozdělit neboli diskretizovat určitý systém na konečný počet prvků. Dělení na prvky není v žádném případě jednoznačné a je silně ovlivněno technickými zkušenostmi a citem řešitele. Potřebný počet prvků k diskretizaci je spojen s požadovanou přesností, velikostí elementů a zahrnutým počtem stupňů volnosti. Více elementů zpravidla značí přesnější řešení, ale pro každý problém existuje určitý počet uzlů N_0 , nad kterým se již přesnost řešení nezvyšuje. Grafické znázornění je uvedeno na **obr. 18** [29].



Obr. 18: Vliv zvyšování počtu elementů na přesnost řešení [29]

Tvorba výpočtového modelu s využitím MKP zahrnuje [31]

- Tvorbu geometrického modelu
- Generování sítě konečných prvků
- Definování vlastností modelu
- Přiřazení vlastností výpočtovému modelu
- Definice požadovaných výsledků analýzy
- Kontrola vstupních dat
- Eliminace chyb vzniklých při diskretizaci řešené oblasti

Základní vlastnosti výpočtového modelu [31]

- Materiálové vlastnosti
- Okrajové a počáteční podmínky
- Zatížení modelu

- Typ prvku
- Geometrické parametry

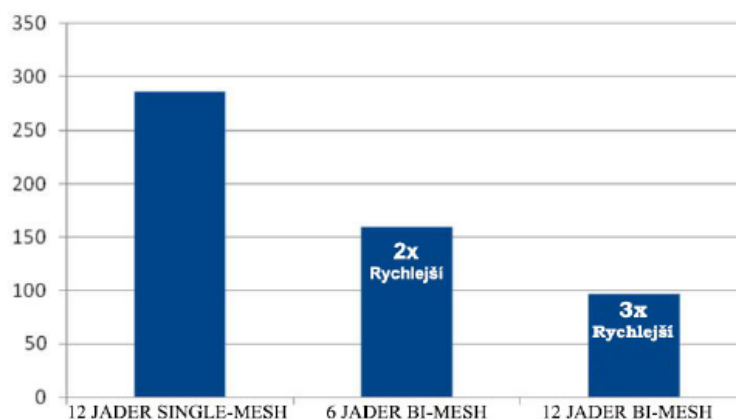
3.6.1 Simulační software

Se stoupající složitostí zápusťkových výkovků rostou požadavky na dokonalé zaplňování dutin zápusťek. V současné době jsou k dispozici výkonné prostředky počítačové podpory, které umožňují sledovat tok materiálu v předem navržené dutině zápusťky a tím dosáhnout eliminaci vad. Počítačové simulace kování se realizují většinou s využitím výpočtových programů, které pracují nejčastěji na bázi metod konečných prvků, anglicky se tyto metody označují jako FEM (Finite Element Method). Simulací lze řešit i velmi složité technologické operace, které jsou neřešitelné nebo obtížně řešitelné analytickými metodami. Simulace nabízí komplexní pohled na studovaný problém a umožňuje tak jeho analýzu na základě více kritérií. Změnou jednoho konstrukčního nebo technologického parametru lze sledovat jeho vliv jak na chování tvářeného materiálu, tak na průběh technologické operace tváření i na případné vady produktu. Mezi známé programy pro numerické simulace procesů objemového tváření se řadí například FORGE NxT, Simufact Forming, DEFORM-3D [13, 32].

Forge®NxT

Forge®NxT je software od francouzské společnosti TRANSVALOR. Tento software nabízí simulovat různé konvekční nebo nekonvekční způsoby tváření za tepla i za studena jako je volné a zápusťkové kování, rotační kování, válcování, válcování kroužků, protlačování, hluboké tažení, děrování, hydroforming. V programu můžeme také vytvořit simulaci tepleného zpracování (indukčního ohřev, kalení, popouštění, normalizační žíhání, nauhličování) Program nabízí širokou databázi materiálů jako jsou např. ocel, hliník, měď, mosaz, titan, slitiny niklu, ušlechtilé kovy a další. Program je založený na výpočtové metodě konečných prvků a konečných objemů a pracuje s konečno-prvkovými elementy ve tvaru jehlanu. Tento výpočetní software nachází využití v různých průmyslech jako např. ve strojírenství, letectví, automobilový průmysl, energetice, stavebnictví nebo zdravotnictví [33].

Software využívá metodu dvou sítí. Porovnání těchto dvou metod v závislosti na výpočetním čase můžeme vidět na **obr. 19**. Metoda automaticky rozděluje výpočty mezi hrubší a jemnější síť. Hrubší síť je využita pro mechanické výpočty deformace a jemnější síť pro provedení tepelných výpočtů [33].



Obr. 19: Porovnání metody dvou sítí v závislosti na čase výpočtu [34].

Software pracuje ve třech modulech. Nejprve v pre-procesoru, který slouží k nastavení vstupních dat před simulací. Druhou částí je simulační modul solver, kde dochází k termomechanickým výpočtům potřebné k analýze procesu tváření a zápis výsledků do databázového souboru. Třetí částí je post-procesor, který umožňuje čtení databáze ze simulačního modulu a zobrazí grafické výsledky [35].

Simufact Forming

Program Simufact umí simulovat velkou řadu výrobních procesů jako např. zápusťkové a volné kování za tepla i za studena, válcování, tváření plechu, protlačování, ohýbání, stříhání a tepelné zpracování. Software pracuje s databázemi různých materiálů jako ocel, neželezné kovy a slitin těchto kovů. Dále tento software využívá dvě numerické metody (metodu konečných prvků a konečného objemu), čímž byl zkrácen čas výpočtu. Své uplatnění nachází ve strojírenství, automobilovém průmyslu nebo v letectví [36, 37].

DEFORM-3D

DEFORM-3D je výkonný systém simulace procesů navržený k analýze trojrozměrného (3D) toku složitých výrobních procesů. DEFORM-3D je praktický a efektivní nástroj pro predikci toku materiálu v procesech velké deformace. Mezi jeho typické aplikace tváření patří, kování, válcování, soustružení, frézování, vrtání, lisování práškem, tepelné zpracování. DEFORM je založen na metodě konečných prvků. Robustní simulační software je schopný predikovat tok materiálu a tepelně - mechanické chování. Software dokáže plně automaticky optimalizovat přesíťování během simulace [38].

4 CÍLE PRÁCE

Cílem této diplomové práce je analýza problému plastického toku materiálu při výrobě mosazných fitinků ze slitiny CuZn40Pb3, které se používají v medicíně jako lůžkové uzavírací ventily. V první řadě bude provedeno sledování plastického toku materiálu za podmínek rozdílné distribuce teplot po průřezu polotovaru, pomocí vytvořené simulace, kopírující reálný postup výroby těchto fitinků. Na základě dodaných reálných vzorků pro experiment budou provedeny jednotlivé dílčí analýzy, které zjišťovaly příčinu defektu. Nejprve bude provedeno zjišťování vybraných mechanických vlastností, za účelem lokalizovat případné vlivy, podílející se na vzniku porušení. Následně bude provedena analýza pomocí optické mikroskopie a taktéž i elektronové mikroskopie. Optická mikroskopie bude cílena na přehledné zachycení plastického toku materiálu při fázi protlačování, zatímco elektronová analýza bude zaměřena především na monitorování samotné trhliny resp. její nejbližšího okolí. A to jak z pohledu chemického složení, tak i fázové analýzy.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA PROCESU VÝROBY MOSAZNÝCH FITINKŮ

5.1 Charakteristika výchozího materiálu

Slitina mosazi s označením CuZn40Pb2 (DIN) patří mezi automatové mosazi s 2 % přísadou olova. Je to normalizovaný druh podle ČSN 423223 a EN CW617N určená k tváření za tepla [39]. Chemické složení mosazné slitiny je uvedeno v **tab. 2**.

Tab.2 Chemické složení mosazné slitiny CW617N v hm %

Cu	Pb	Fe	Sn	Ni	Zn
57-59	1.6-2.5	≤0.3	≤0.3	≤0.05	zbytek

Daná slitina CuZn40Pb2 je dobře obrobitelná, neboť přísada olova příznivě působí na vznik krátké třísky při obrábění. Má velmi dobrou odolnost proti atmosférické korozi, ale podléhá koroznímu praskání a odmíšení zinku v roztocích soli a mořské vodě. Vhodná je pro výrobu šroubů, matic a jiných součástek hromadné výroby. Používá se na výkovky, výlisky, armatury a na profily pro elektronické účely [39].

5.2 Nástin řešeného problému u mosazného fitinku

Vstupní materiál pro tváření fitinku je uveden na **obr. 20** Jedná se o kruhový špalek s rozměry Ø 22x 146,3 mm a hmotnosti 468 g.

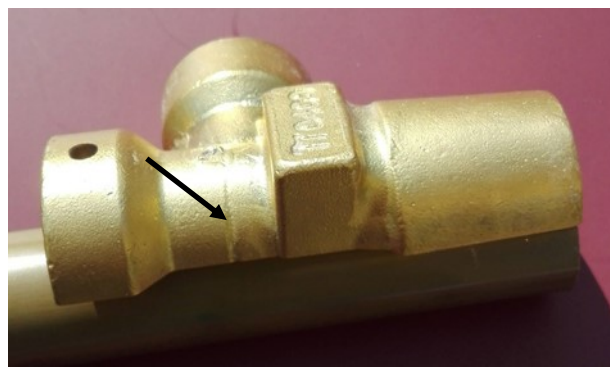


Obr. 20: Špalek pro výrobu fitinků

Vzorky pro jednotlivé analýzy byly dodány ze společnosti GCE. Vytvořený defekt na fitinku je vyznačený černou šipkou na **obr. 21**.



a) kompletní ventil

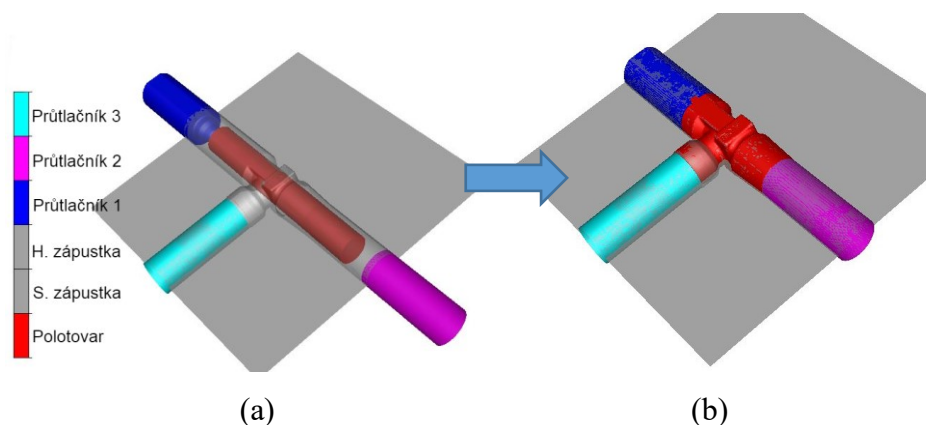


b) řez fitinku

Obr. 21: Zobrazení trhliny mosazného fitinku

5.3 Simulace výroby fitinku

Sestavená simulace výroby fitinku zápustkovým kováním byla vytvořena za pomoci komerčního software FORGE®NxT 3.0. Simulace je složena ze šesti součástí, a to vstupním polotovarem, třemi průtlačníky, horní a spodní zápustkou viz **obr. 22**.



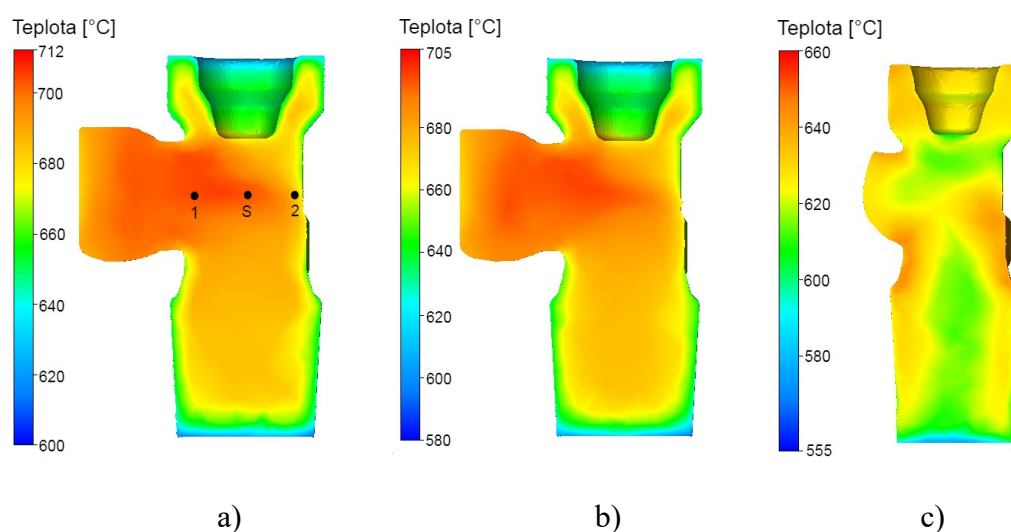
Obr. 22: Stádia výroby mosazných fitinků: výchozí (a), finální (b)

Mezi podmínkami prováděné simulace byly definovány 3 možné případy (jako důsledek nehomogenního aplikovaného indukčního ohřevu viz **Obr. 23**. V prvním se

jednalo o homogenní distribuci tvářecí teploty po průřezu ohřívaného polotovaru. Druhý případ byl charakterizován teplejším povrchem a studenější osovou částí ohřívaného polotovaru. Ve třetí variantě se pak simuloval vývoj tváření v případě, že osová část polotovaru vykazuje vyšší teplotu, nežli jeho povrchová část. Následně byly tyto tři varianty vzájemně srovnávány s pohledu vybraných výsledků, které mohly ovlivnit samotný finální tvar vykovaneho fitinku.

5.3.1 Analýza plastického toku materiálu

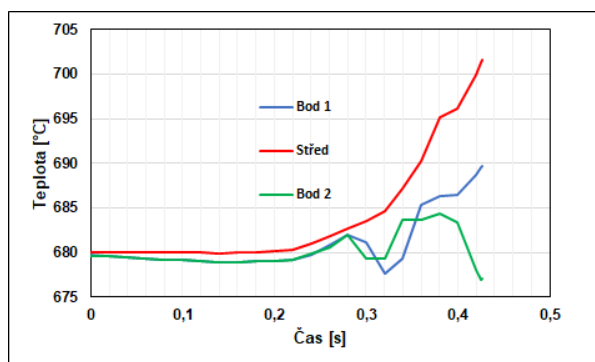
S cílem zjistit vliv rozdílné distribuce teploty na plastický materiálový tok mosazi byla hodnocena kvalita zaplnění dutiny zápustky. Tento **obr. 23c** zobrazuje teplotní pole v řezu dokončeného fitinku. Vliv nerovnoměrného prohřátí s teplejším povrchem a studenějším středem mělo za následek degradace hrdla fitinku viz. **obr. 23c**.



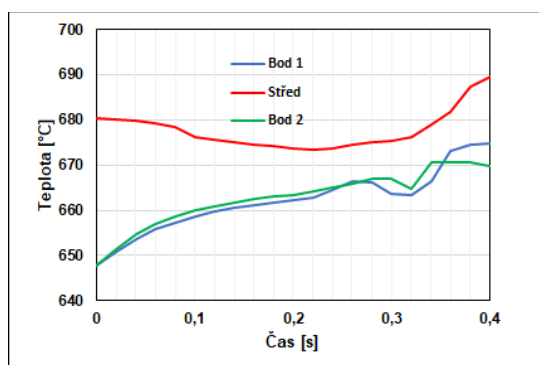
Obr. 23: Teplotní pole v řezu fitinků: (a) homogenní (b) teplejší střed (c) studenější střed

Pro lepší přehled vývoje nehomogenní teploty v průběhu simulace byly sestaveny grafy v závislosti na čase viz. **obr. 24**. Jak je vidět na **obr. 23** průběh teplot byl sledován na povrchu v podélném řezu polotovaru ve dvou krajních bodech a jednou ve středové části. Na **obr. 24a** můžeme vidět, že výchozí teplota před tváření fitinku byla 680 °C. Měřená hodnota teploty ve středové části během tváření v čase 0,3 sekund exponenciálně vzrostla, až na teplotu 712 °C. Na krajních bodech byla teplota kolísavější. Grafická

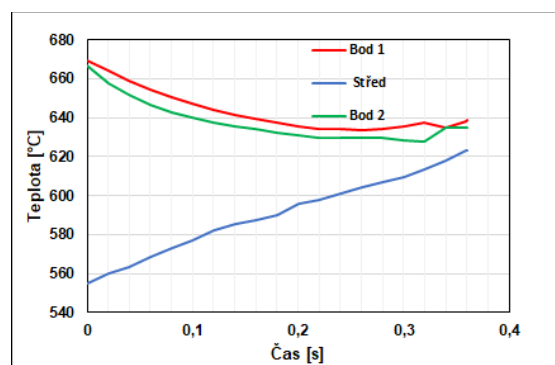
závislost na **obr. 24b** vykazuje, že polotovár před tvářením byl ohřát ve středové části na 680 °C naopak na povrchu byla teplota o 50 °C nižší. Ve třetím případě na **obr. 24c**, kdy došlo k degradaci hrdla vlivem nerovnoměrné teploty byl polotovár před tvářením ohřát ve středové části na teplotu 550 °C a na povrchu byla teplota 680 °C. Z trendu křivek vidíme, že teplota v průběhu deformace ve středové části roste s výjimkou studenějšího profilu.



a)



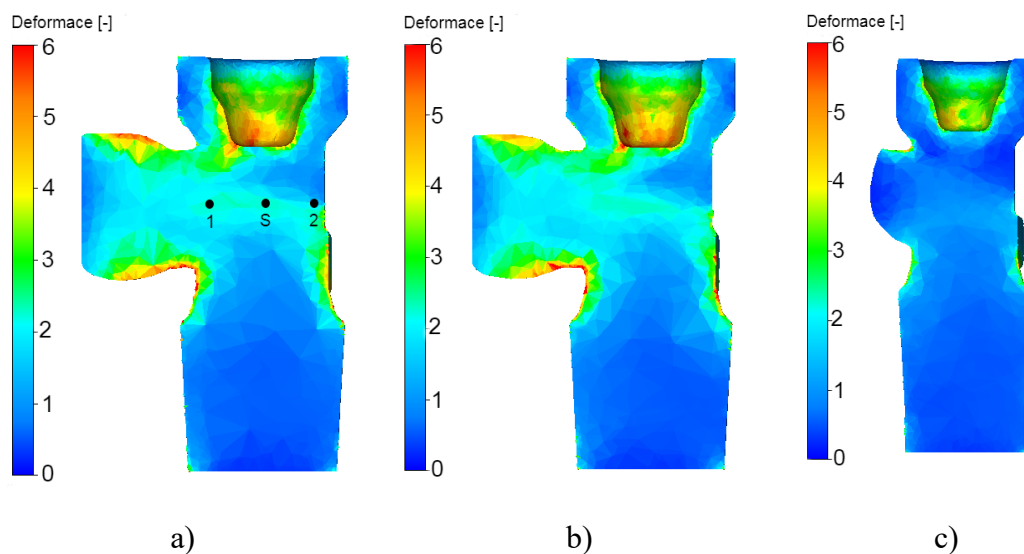
b)



c)

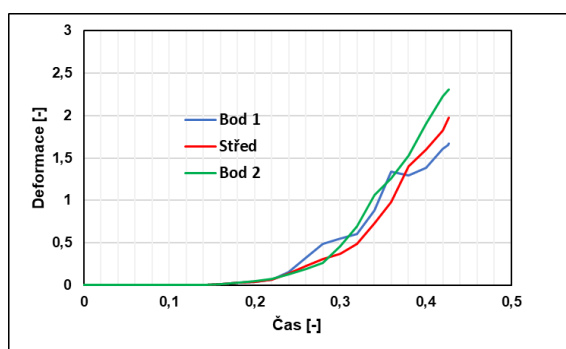
Obr. 24: Závislost teploty na čase pro: (a) homogenní profil (b) teplejší střed (c) studenější střed

Další sledovanou veličinou byla vložená deformace v řezu hotového fitinku. Z předloženého **obr. 25** lze vidět, že nejvyšší hodnoty vložené deformace se vyskytují po krajích tvořeného hrdla fitinku, a také ve vytvořené dutině pro uzávěr. Tyto oblasti se zelenou a červenou barvou dosahují hodnot od 3 až 6. To nám predikuje, že v těchto místech bude docházet k největšímu deformačnímu zpevnění, čím může dojít k jejich opotřebení. Vlivem nerovnoměrné distribuce teploty po průřezu fitinku nám v těchto místech deformační zpevnění klesá **obr. 25b** a **obr. 25c**.

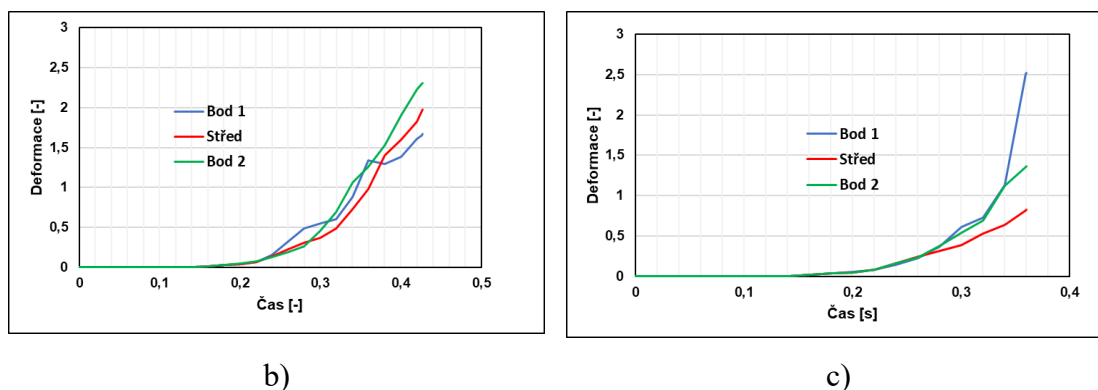


Obr. 25: Vložená deformace v řezu fitinků pro: (a) homogenní profil (b) Teplejší profil (c) Studenější profil

Závislost vložené deformace na čase v určených bodech viz. **obr. 25** pro všechny 3 možné případy ohřevu popisují grafy na **obr. 26**. Z grafu je zřejmé, že k výrazné deformaci došlo, až od času 0,2 sekund. Trendy vývoje křivek ve středové části a v krajním bodě 2 pro homogenní profil viz **obr. 26a** a teplejší profil viz **obr. 26b** vykazují na konci deformace v čase 0,4 sekund hodnotu 2, oproti tomu křivka pro studenější profil **obr. 26c** má tuto hodnotu o výrazně nižší. Největší deformace nastala v krajním bodě 2 u profilu se studenějším středem.

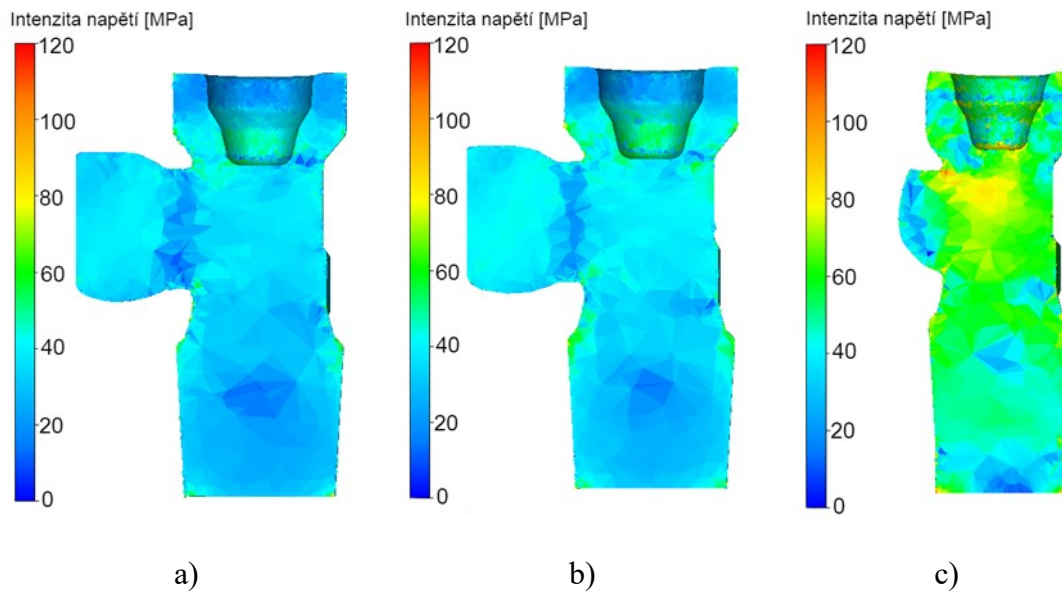


a)



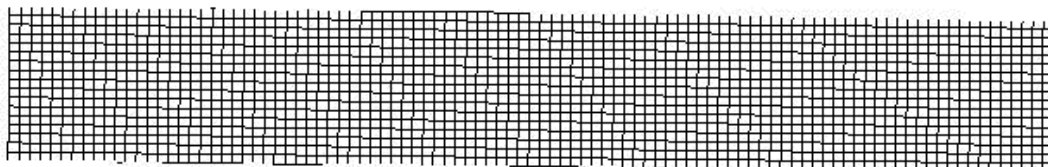
Obr. 26: Závislost vložené deformace na čase pro: (a) homogenní profil (b) Teplejší profil (c) Studenější profil

Vliv intenzity napětí po dokončení tváření fitinku pro všechny tři variace indukčního ohřevu vidíme na **obr. 27**. Nejvyšší hodnoty napětí u fitinku s homogenní teplotou dosahují k 70 MPa. Dále deformační odpor v kritických místech roste, vlivem nerovnoměrného ohřevu,

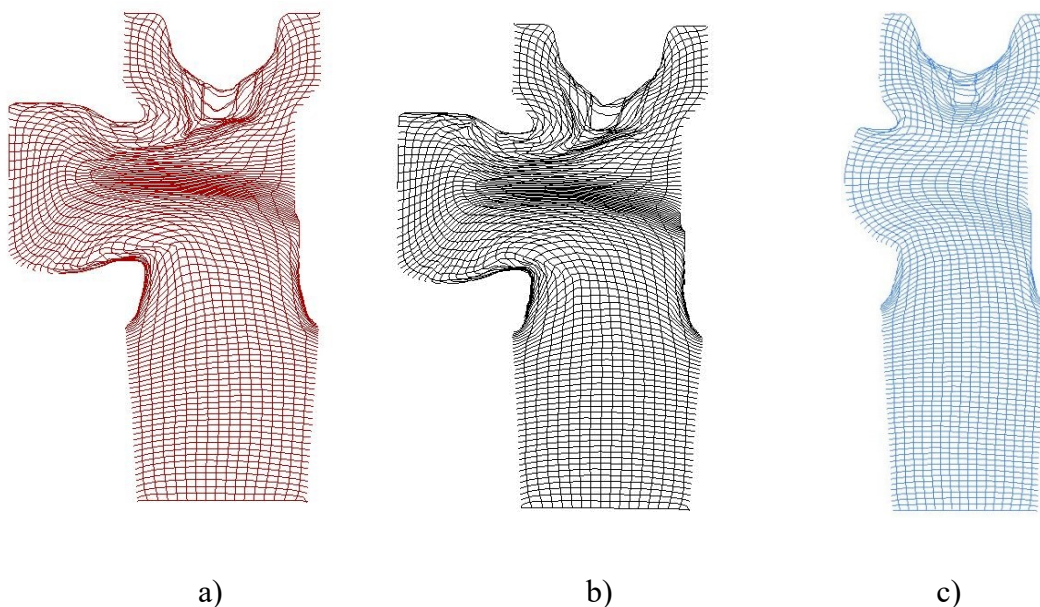


Obr. 27: Intenzita napětí pro tři podmínky: a) homogenní profil b) teplejší profil c) studenější profil

Na **obr.28** je síť proložená polotovarem před deformací. Z vytvořených sítí můžeme vidět jakým směrem proudil plastický tok kovu a na jakých místech byla největší vložená deformace viz **obr. 29**. Největší vložená deformace byla ve středové části a také v dolních místech hrany tvořeného hrdla.

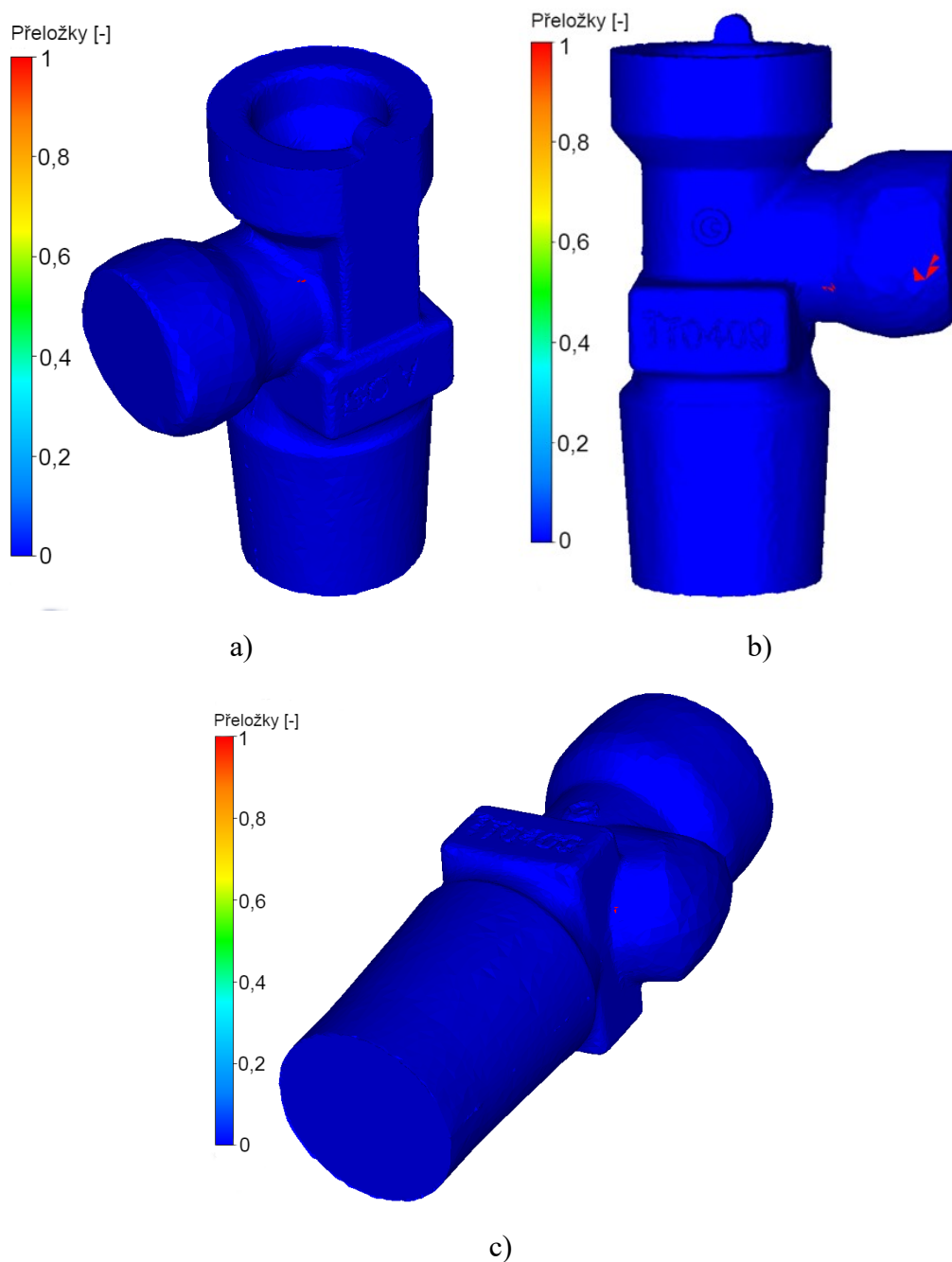


Obr. 28: Proložená síť polotovarem před deformací



Obr. 29: Sítě po deformaci v konečné fázi: a) homogenní profil b) teplejší profil c) studenější profil

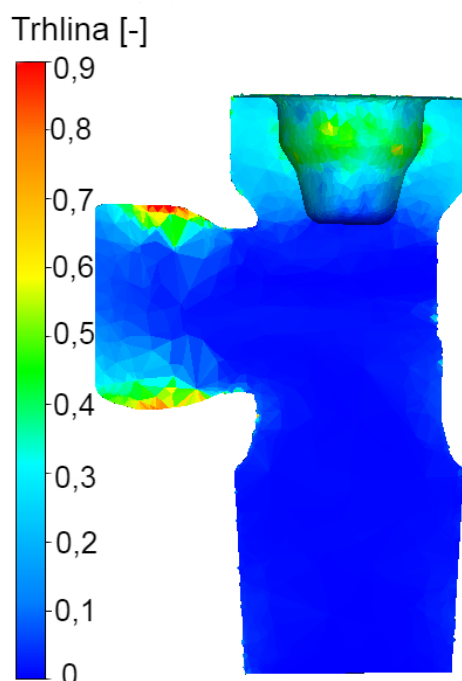
Vlivem nesprávného toku materiálu, může na fitinku vzniknout nežádoucí vada neboli přeložka. Tyto přeložky vznikají například z důvodu špatného konstrukčního návrhu modelu nebo dutin zápusťky. Z předloženého **obr. 30** si můžeme všimnout míst ve kterých je predikován nejpravděpodobnější vznik přeložek, které jdou vidět v zaoblených hranách na začátku tvoření hrdla.



Obr. 30: Přeložky na fitinku: a) homogenní profil b) teplejší profil c) studenější profil

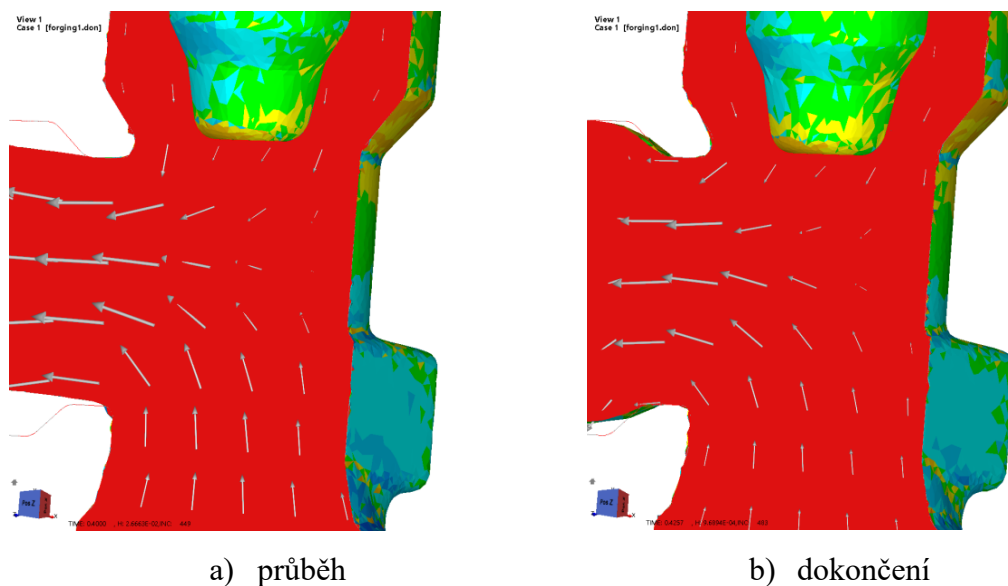
Pravděpodobnost vzniku trhliny je uvedena na **obr. 31**. Největší pravděpodobnost vzniku trhliny je vyznačena červeným místem na horní a spodní hraně hrdla fitinku. Je třeba ale uvést, že tento parametr vycházel z Latham-Cocroftova kritéria, které je založeno zejména na výskytu a velikosti tahových napětí v materiálu a není tudíž nejvhodnějším kritériem pro technologii protlačování. Na druhé straně, použití jiného kritéria např. Oyaneho by si vyžadovalo podrobnější vstupní informace pro jeho

výpočet. Z důvodu velmi omezené možnosti jejich získání (omezený provoz firmy) by však bylo velmi obtížné jejich získání a zpracování do této práce.



Obr. 31: Možnost vzniku trhliny

Jak plyne z přiloženého **obr. 32**, plastický tok materiálu ukazuje na významnou preferenci „odklonění“ směrnice pohybu materiálu. Jak horní objem protlačovaného materiálu, tak i spodní část jsou v důsledku platnosti zákona o pohybu částic cestou „nejnižšího deformačního odporu“ stáčeny směrem k výstupnímu hrdlu fitinku. Pokud předpokládáme nejmenší materiálový tok v oblasti stěny matrice, o kterou se „opírá“ mosazný fitink v místě, kde vzniklo analyzované porušení, a zároveň při finální fázi dojde k „dolisování“ ze strany výstupního hrdla fitinku, je toto jednou z hlavních příčin vzniku porušení. Je třeba poznamenat, že samozřejmě v případě nerovnoměrné distribuce teploty po průřezu ještě před samotným tvářením je difference v plastickém toku ještě markantnější. To logicky ústí do problematiky svázané s distribucí napětí generovaného plastickou deformací. Jinými slovy, velké rozdíly plastického toku materiálu znamenají vyšší nebezpečí především tahových pnutí, které mohou stát za vznikem trhlín.

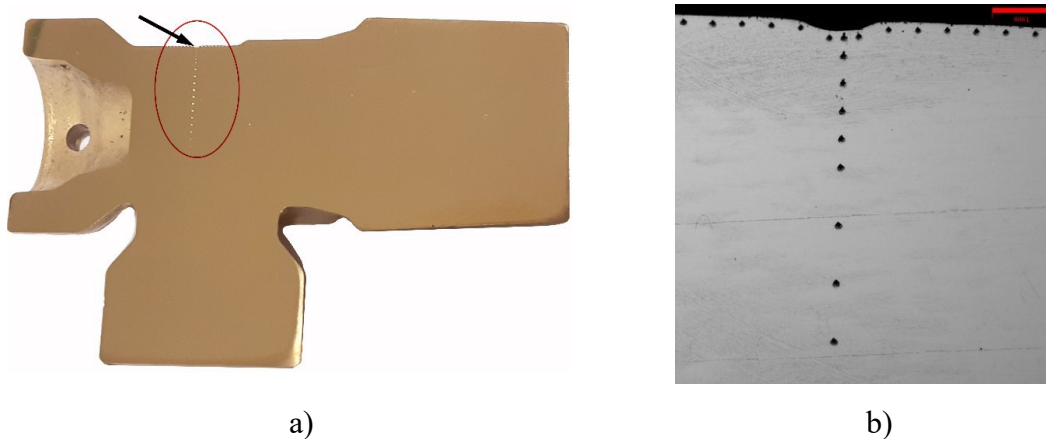


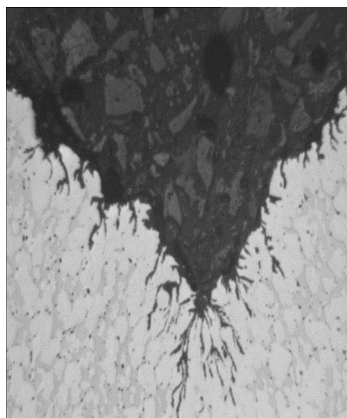
Obr. 32: Vektor plastického toku materiálu

6 DISKUSE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

6.1 Lokalizace trhliny a měření tvrdosti

Jedna z prvotních analýz, které sledovali příčiny vzniku trhliny bylo testování tvrdosti v kritickém místě tvářeného fitinku. Tato analýza měla za účel lokalizovat případné defekty v podélném řezu fitinkem, přičemž detail a lokalizace trhliny jsou vyznačeny šipkou, resp. eliptickým výběrem. viz. **obr. 33a**. Tvrdost mosazného fitinku byla testována podle Vickerse HV30. Vpichy byly provedeny v podélném profilu na hraně fitinku a příčném směru kolmo do středu fitinku viz. **obr. 33b**. Detail trhliny je přiblížen na **obr. 33c**.

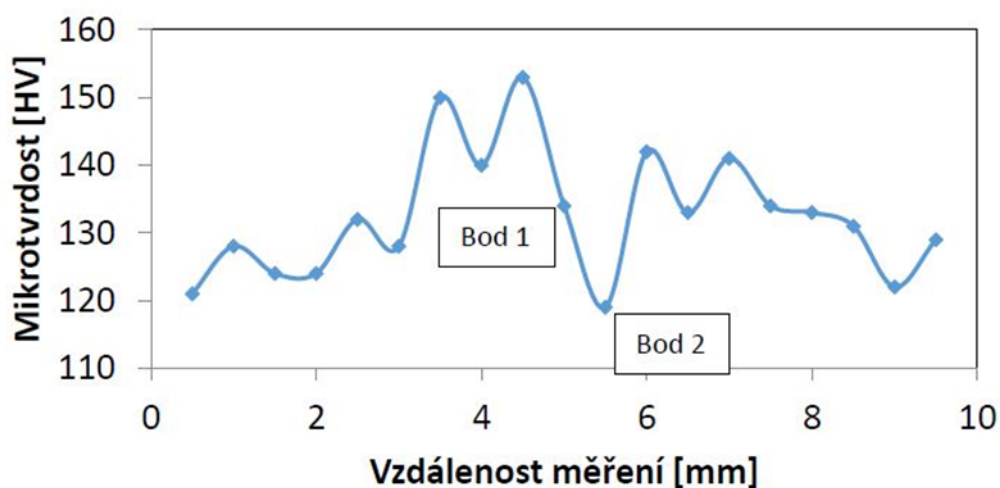




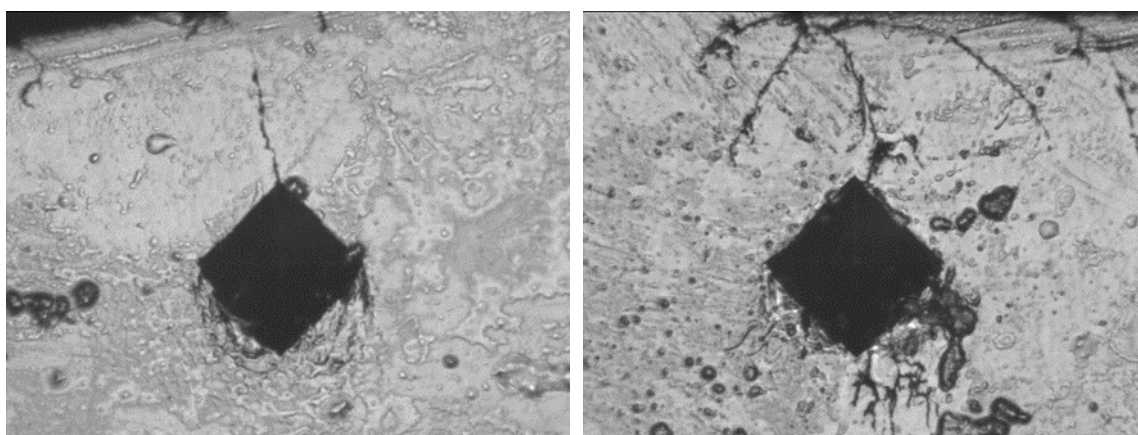
c)

Obr. 33: Testovaný řez fitinku s lokalizací trhliny: a) Lokalizace trhliny v testovaném řezu fitinku b) směry testování tvrdosti c) Detail trhliny

Mechanické vlastnosti analyzované mosazi byly zjišťovány s cílem najít případné lokalizované defekty, podílející se na vzniku porušení. Jak je patrné z příloženého **obr. 33a** a **obr. 33b**, byl získán profil tvrdosti na hraně fitinku (podélný profil – **obr. 34a**), kde se nacházela sledovaná trhlina a pak také z kolmého směru (příčný profil), přičemž tento profil zasahoval, až do poloviny průřezu (**obr. 35**).



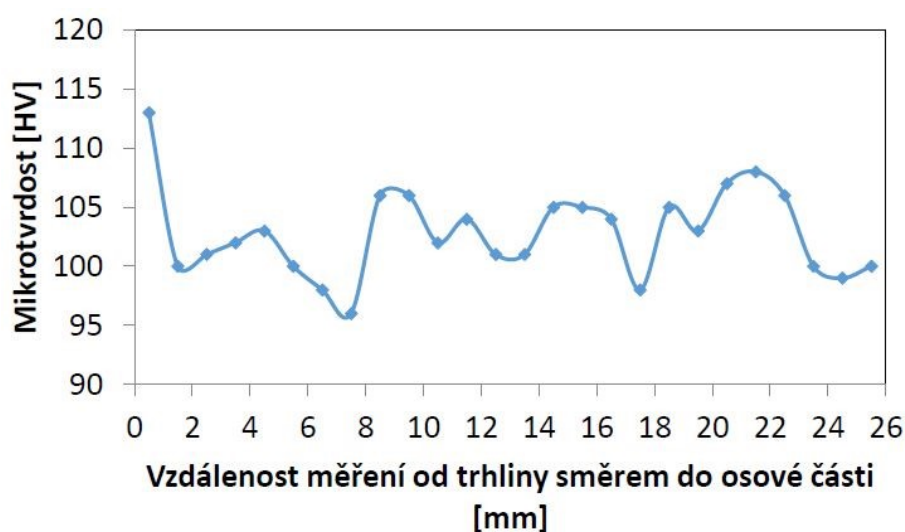
a)



b)

c)

Obr. 34: Podélný profil tvrdosti: a) grafická závislost b) bod 1 b) bod 2

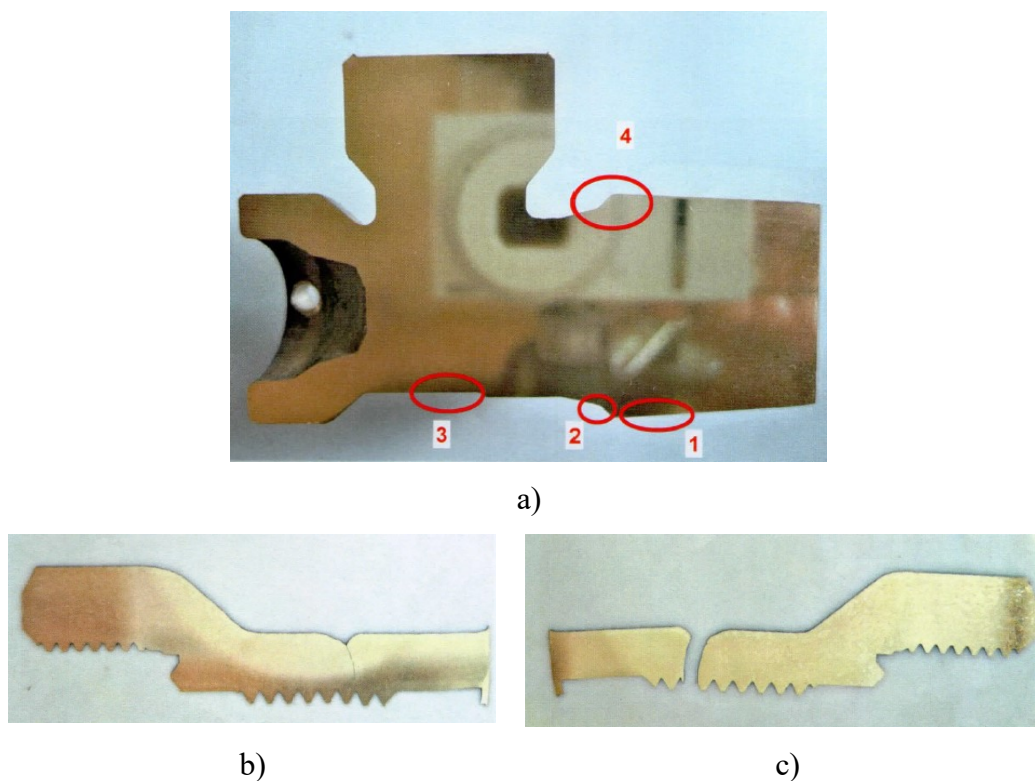


Obr. 35: Příčný profil tvrdosti

Jak dokládají přiložené obrázky, v okolí trhliny je možné sledovat prokazatelný nárůst hodnot tvrdosti, přičemž s rostoucí vzdáleností od trhliny pak dominuje spíše lineární profil s jistými oscilacemi, způsobenými kontaktním místem indentoru a dané fáze mosazi. Je evidentní, že jak podélný, tak i příčný směr testování tvrdosti potvrdil stejný závěr. Po této prvotní analýze tedy bylo zřejmé, že velmi pravděpodobně musí existovat faktor stojící za tímto zjištěním.

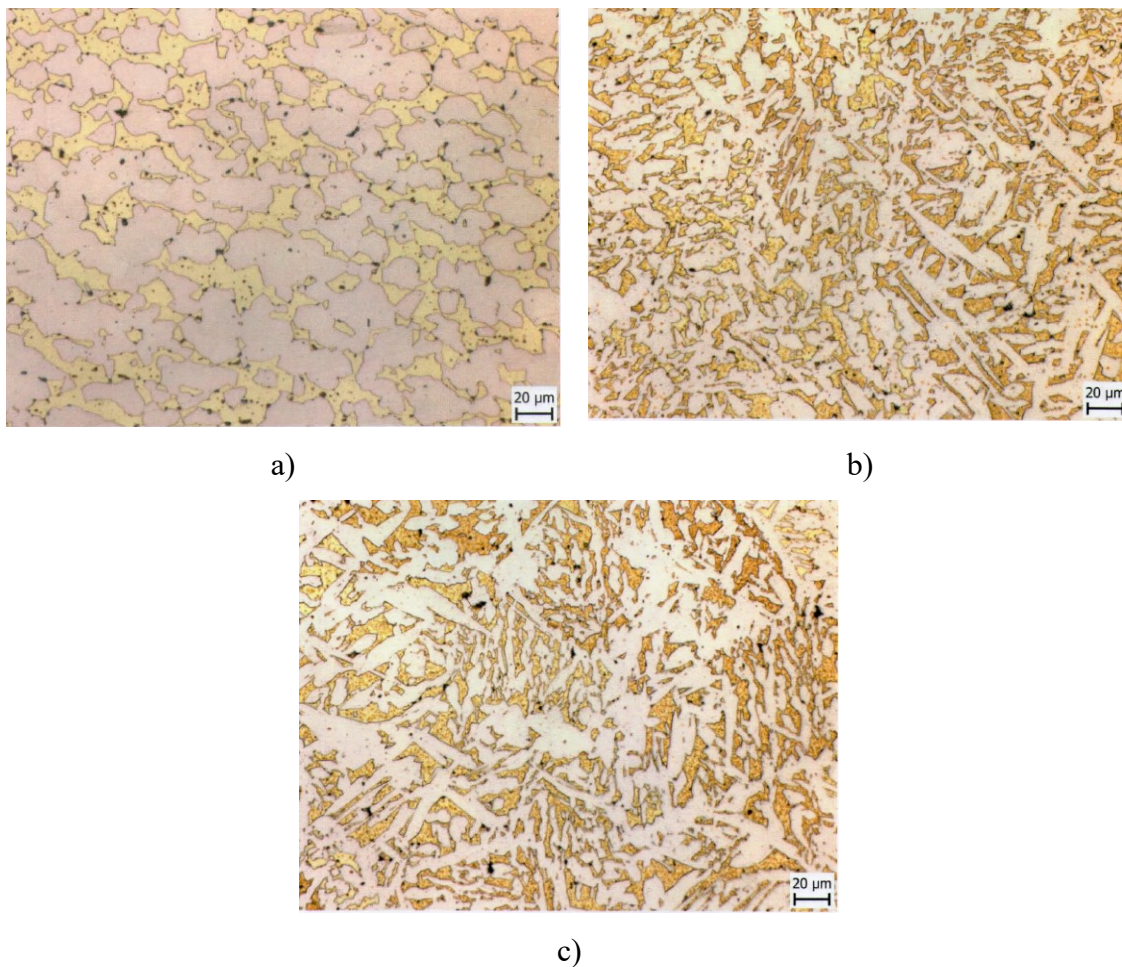
6.2 Optická mikroskopie

Optická mikroskopie směřovala na přehledné zachycení plastického toku materiálu při fázi protlačování. Metalografická analýza byla provedena v podélném řezu fitinku a na výřezech v místech s trhlinou **Obr.36**. Mikrostruktura všech experimentálně testovaných vzorků je uvedena na **obr. 37**.



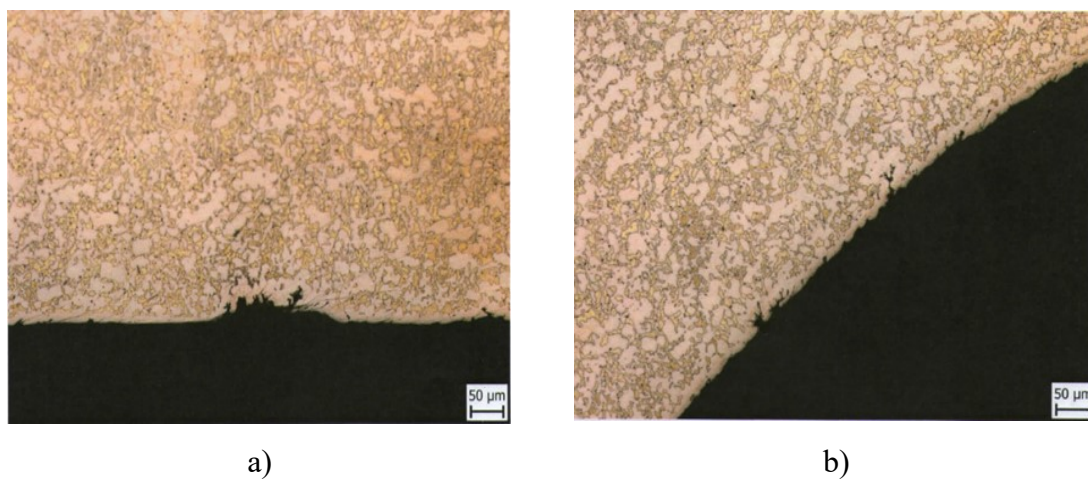
Obr. 36: Testované vzorky a) řez fitinku b) výřez s trhlinou 1 c) výřez s oddělenou trhlinou

Mikrostruktura u všech testovaných vzorků viz **obr. 37** odpovídá stavu po kování a je tvořena tuhým roztokem α a fází β 26 %. Dále se ve struktuře vyskytují drobné částice olova o velikosti 2-10 μm , které jsou rovnoměrně rozptýlené v matici.



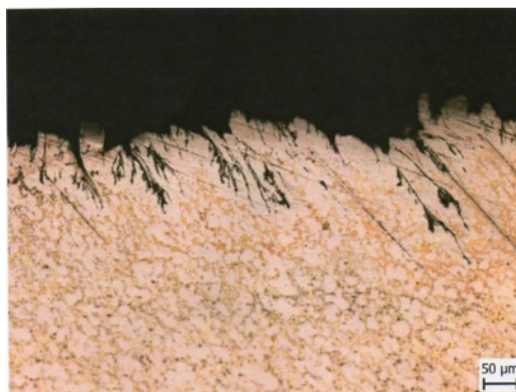
Obr. 37: Mikrostruktura testovaných vzorků a) řez fitinku b) výřez s trhlinou c) výřez s oddělenou trhlinou

Mikrostruktury uvedené na **obr. 38** dokládají, že na krajích v určitých místech během protlačování dochází k narušení struktury ve formě trhlin.





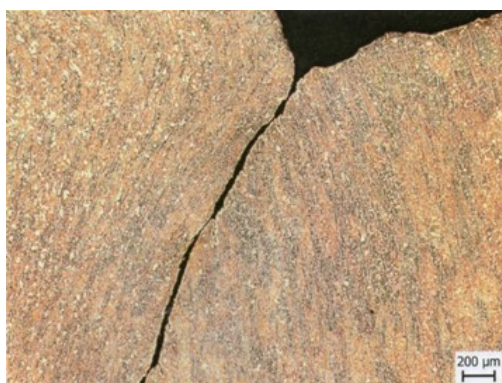
c)



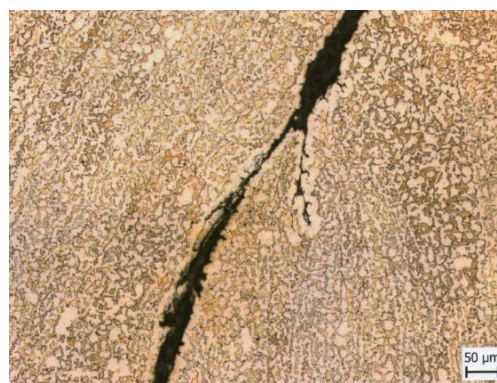
d)

Obr. 38: Struktura zkoumané oblasti v řezu fitinku (a) oblast 1 b) oblast 2 c) oblast 3
d) oblast 4

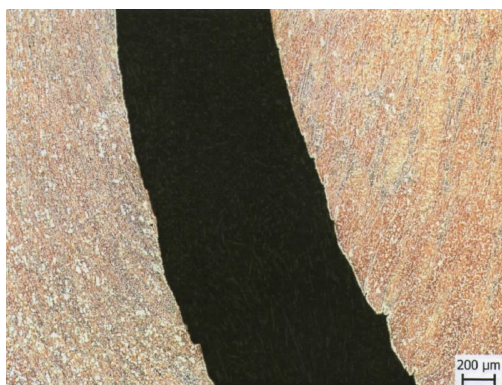
Mikrostruktura s trhlinou sledována na výřezech je uvedena na **obr. 39**.



a)



b)



c)

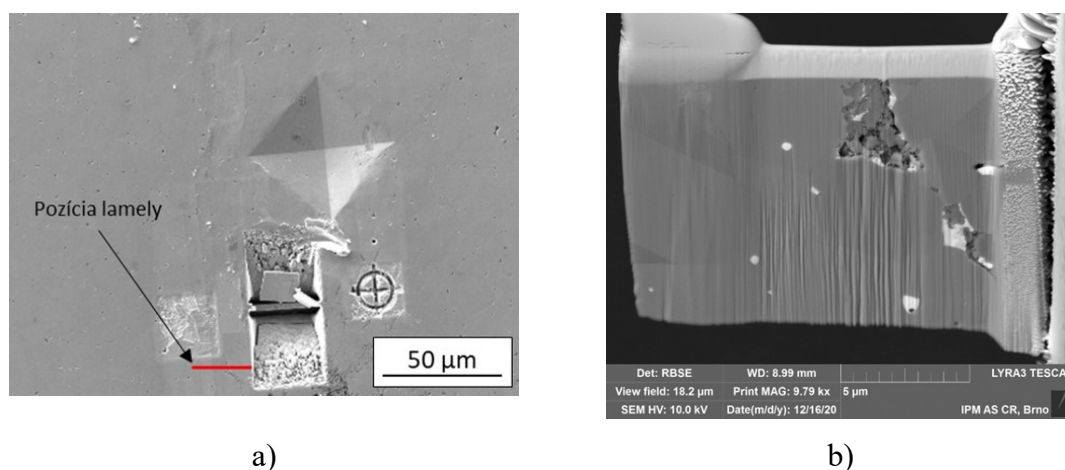


d)

Obr. 39: Výřez: (a-b) s trhlinou (c-d) s oddělenou trhlinou

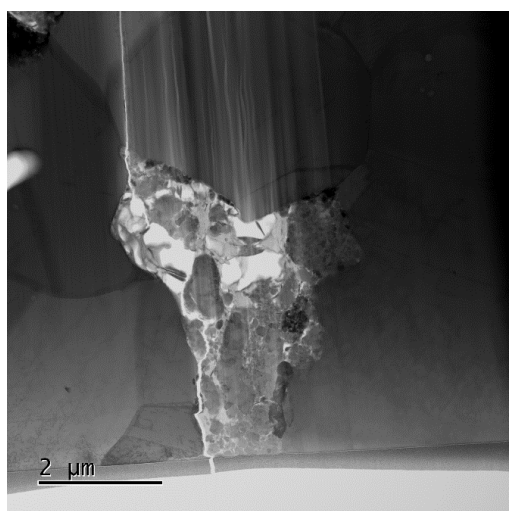
6.3 Transmisní elektronová mikroskopie a EDS analýza

Metodologicky sestavená TEM analýza se skládá ze dvou hlavních kroků. Prvním bylo odebrání lamely mosazi, pomocí metody FIB (Focused Ion Beam), z míst, ve kterých byla detekována trhlina. Druhým pak samotná analýza chemického složení (EDS) vytipovaných míst v oblasti trhliny.

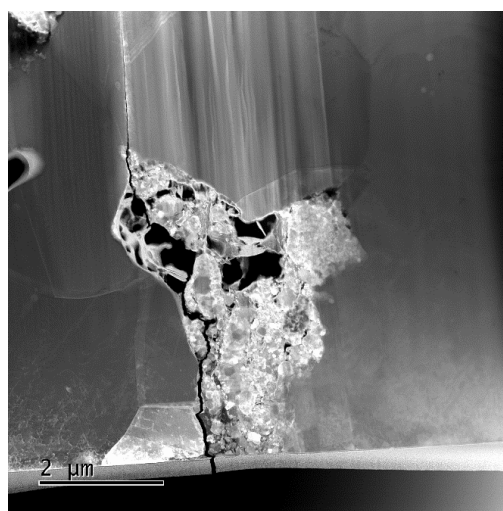


Obr. 40: SEM snímek: a) místo odběru lamely, b) lamela před finálním přeleštěním

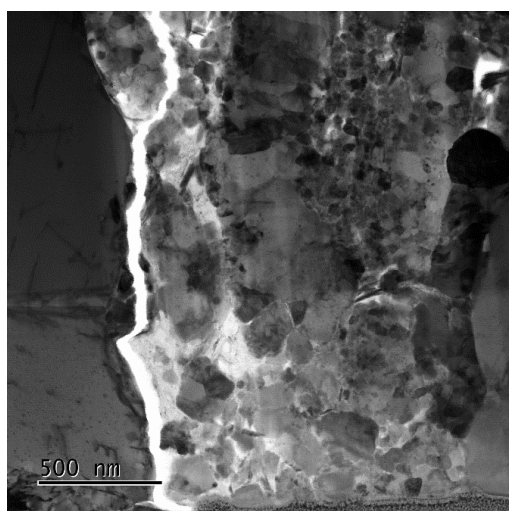
Jak ukazuje **obr. 40a** v pozici trhliny byla příčně odebrána lamela testované mosazi (červená čára). Tato lamela, jak je zjevné z **obr. 40b** obsahovala podle předpokladů lokální necelistvost struktury, která byla následně analyzována pomocí EDS metody z pohledu chemického složení. V dalším kroku byla takto odebraná lamela mosazi vyleštěna a podrobena TEM analýze jednak za účelem získání informací o vývoji mikro/sub struktury, a také pro celkový přehled charakterizace samotné necelistvosti podílející se na podpoře vzniku/šíření trhliny. Pro tyto účely bylo využito dvojího zobrazení téhož místa, tj. zobrazení ve „světlém poli“ (bright field, BF) a ve „tmavém poli“ (dark field, DF). Tato možnost dvojího zobrazení totiž nabízí vyšší možnost zachycení detailů či artefaktů, které mohou být vidět rozdílně v obou případech a mohou tak být lépe hodnoceny.



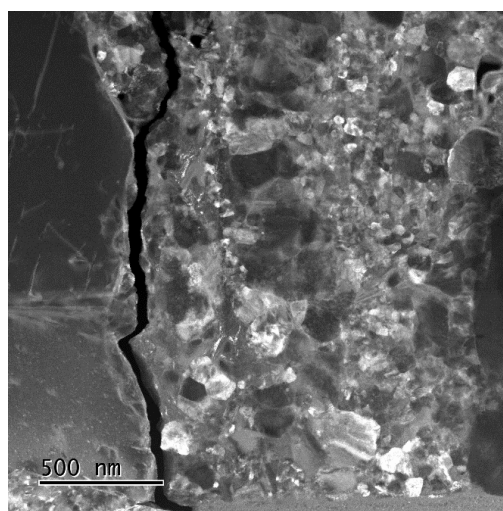
a) světlé pole



b) tmavé pole



c) světlé pole

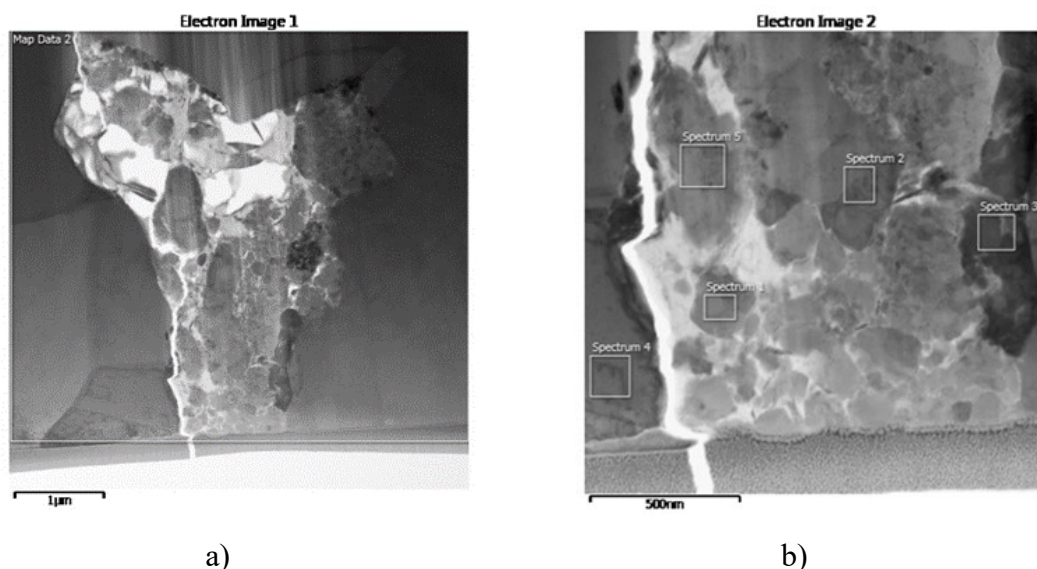


d) tmavé pole

Obr. 40: STEM obrázky zkoumaného místa.

Jak přibližuje **Obr. 41a** až **41d** trhlina se šířila přesně po hranicích oxidu, který byl zde detekován. Přítomnost tohoto oxidu velmi oslabila kohezní pevnost tvářené mosazi. Protože jsou detekované oxidy s velkou pravděpodobností tvrdší (a daleko méně tvárné) nežli je okolní matrice kovu (mosaz), nemohou být považovány za adekvátní materiálovou strukturu skrze kterou by se mohla plastická deformace šířit bez vzniku daného typu porušení. Je patrné, že přestože se jedná o velmi jemnozrnný až nanokrystalický (jednotlivá zrna jsou menší nežli 100 nm) oxid, není tento jednotypový. Jak ukázala následně prezentovaná analýza chemického složení **Obr. 42** až **Obr. 43** jedná se v podstatě minimálně o 2 oxidy. Prvním je oxid typu PbCuO , druhým je CuZnO . Přestože jsme dále nesledovali přesný typ oxidu (necharakterizovány poměrově jednotlivé složky) je

viditelné, že průběh trhliny se šíří skrze rozhraní mosaz/PbCuO resp. CuZnO, kde je tudíž soudržnost struktury nejnižší. Na základě všech výsledků není tudíž pochybnost, že mezi dominantními faktory stojícími za vznikem porušení je také kvalita/homogenita chemického složení tvářené mosazi. S velkou pravděpodobností, je to ale metalurgický problém (tzn. vznik oxidů je již při výrobě mosazi). Při fázi ohřev/tváření může docházet k jistým modifikacím, ale je nepravděpodobné, že by vznik směsi oxidů byl způsoben až v této fázi procesu.



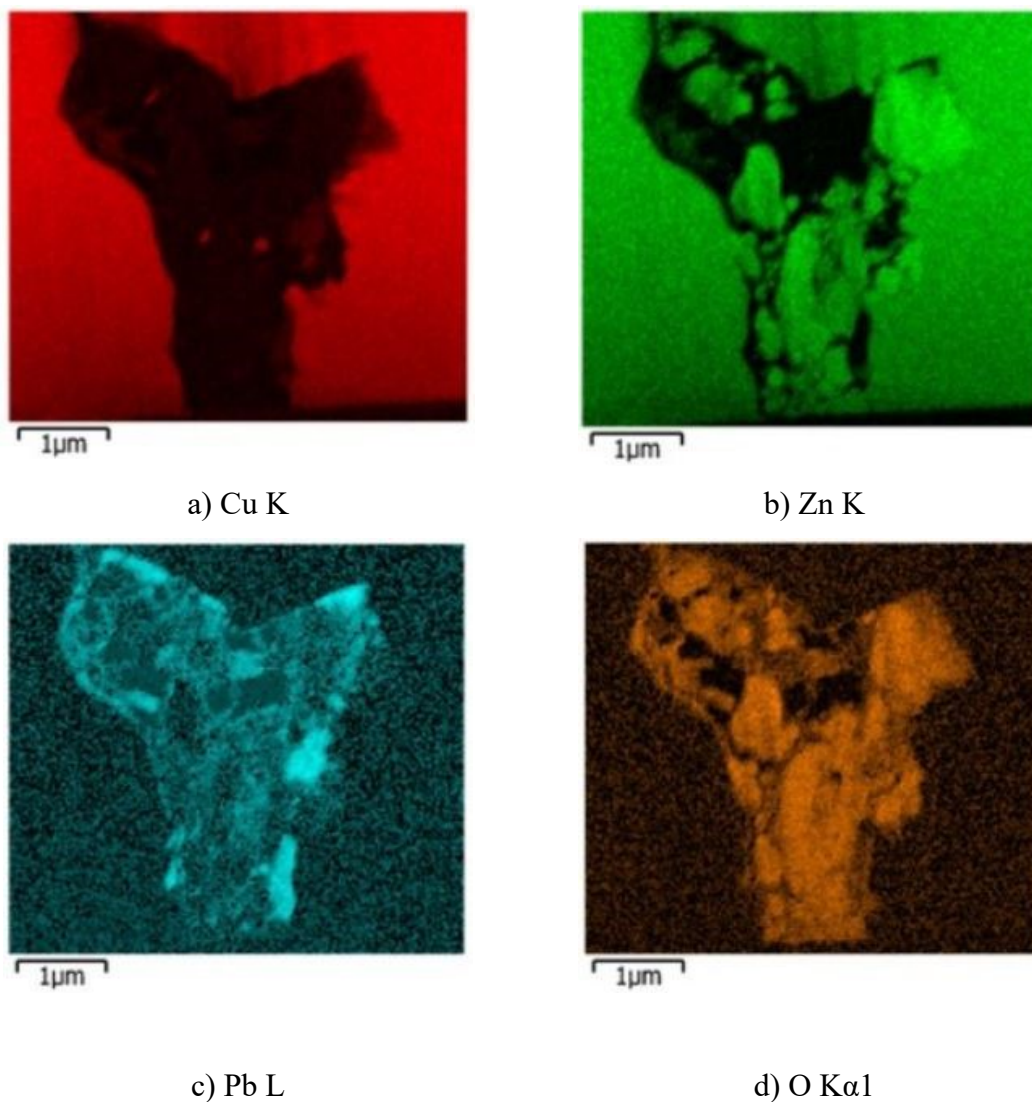
Obr. 42: chemického složení: a) oblast EDS mapování, b) analyzované oblasti

Tab. 2: Chemické složení oblastí z obrázku 3 (v at. %).

Spectrum label	O	Fe	Cu	Zn	Pb
Spectrum 1	40.15	0.44	5.59	43.76	0.22
Spectrum 2	39.7	0.61	5.04	46.30	0.25
Spectrum 3	27.03		32.50	1.30	39.16
Spectrum 4		0.31	67.36	31.69	
Spectrum 5	41.07	0.41	5.92	44.02	0.36

Analýza chemického složení provedená v místě trhliny prokázala zastoupení oxidu mědi a to v relativně nezanedbatelném množství (cca 3 % wt.) viz. **tab 2**. Výskyt zvýšeného množství oxidu ve struktuře v podstatě odpovídá místům s vyššími hodnotami tvrdosti. Je prokázáno, že tento oxid není pozůstatkem metalografické přípravy vzorků, ale s velkou

pravděpodobností je to charakteristika chemického složení. Dále bylo zjištěno, že v podstatě celý povrch fitinku v místě trhliny byl ochuzen o β fázi, to znamená, že struktura v těchto místech by se měla vyznačovat nižší plasticitou.

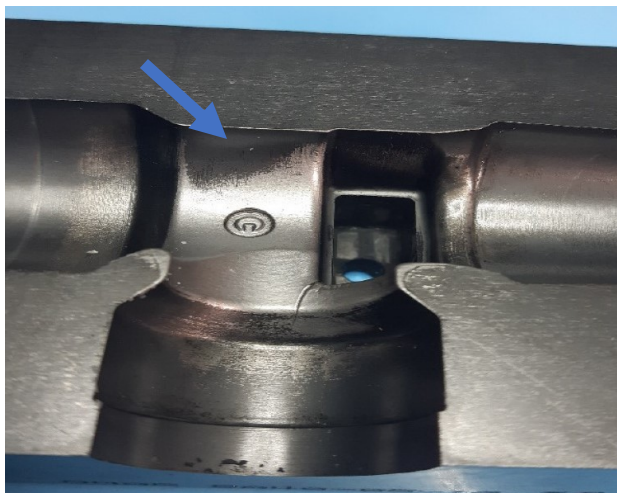


Obr. 43: Výsledky EDS mapování

6.4 Opotřebení zápustky

Opticky se zdá být navíc analyzovaný defekt v jisté spojitosti i s opotřebením zápustky. Při pohledu na inkriminované místo je viditelné, že materiál velmi intenzivně „klouže“ zejména po povrchu zápustky před kritickým místem (o čemž svědčí zrcadlovitý/vyleštěný charakter povrchu zápustky), zatímco v místě lokalizace trhliny je

vidět na zápustce tmavý povrch (bez intenzivního otěru) vyznačený modrou šipkou viz. **obr. 44**. To by potvrzovalo výše uvedené závěry o plastickém toku materiálu. Zjednodušeně řečeno, tření mezi povrchem mosazného polotovaru a stěnami zápustky není stejné – tj. shora a zespod má materiál při svém plastickém toku odlišné třecí podmínky.



Obr. 44: Detail povrchu použité matrice

7 ZÁVĚR

V Experimentální části této diplomové práce jsem se zabýval problémy plastického toku materiálu a zkoumáním příčiny vzniku porušení při výrobě mosazných fitinků. V první řadě byl sledován vliv rozdílné teploty po průřezu polotovaru během tváření za použití indukčního ohřevu. Následně byly provedeny jednotlivé dílčí analýzy, která odhalily další faktory stojící za příčinou degradace fitinku.

Z provedených simulací plastického toku bylo zjištěno, že v důsledku protlačování mosazného polotovaru dochází ke generování napětí po jeho průřezu. V místě, kde obvykle vznikají porušení je tento napěťový stav velmi často tahového charakteru. Ve spojení s uvedeným chemickým složením, jenž se podepisuje na významně nehomogenním profilu tvrdosti, je pravděpodobné, že tyto faktory stojí za vznikem trhlin. Pokud ještě přičteme problém nehomogenního rozložení teploty po průřezu polotovaru v důsledku aplikovaného indukčního ohřevu, pak nebezpečí vzniku porušení ještě vzroste. Důvody jsou především například snížená plasticita a tedy vyšší generované napětí v polotovaru. K tomu přistupuje další problém spojený s absencí β fáze (tzn. tato fáze by měla podporovat plastičtější chování při protlačování) v těchto regionech.

Hlavními faktory, které stojí za příčinou vzniku trhliny jsou již zmiňované problémy s heterogenitou teploty, velmi rychlý odvod tepla zejména z povrchových a podpovrchových vrstev a již avizované variace chemického složení. Ve výsledku dochází ke vzniku napětí, které má za cíl vyrovnat tento gradient plastického toku. Jeho velikost a charakter bude odvislý od teploty, chemického složení a fázového zastoupení v kritickém místě.

Jako hlavní kroky k nápravě současného stavu výroby a problémů s ním související je třeba zvažovat opatření vedoucí k homogennímu rozložení teploty ve tvářeném polotovaru při samotné výrobě. Mezi jinými je ale potřeba zajistit kvalitativní hledisko výchozího materiálu z pohledu chemického složení. V neposlední řadě by mohlo přispět také provedení jistých konstrukčních úprav zápusťky vedoucích ke změně plastického toku materiálu a s tím spojenému ovlivnění napěťového stavu tvářené mosazi.

LITERATURA

- [1] *Katalog výrobků*. GCE mediline: [online]. Chotěboř, 2018 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://www.jfkplus.sk/katalog.pdf>
- [2] *Tlaková láhev* Česká asociace technických plynů: [online]. Praha, 2013, 4-36 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://media.revgroup.hu/2/2020/01/čatp-tlakova-lahev-003.pdf>
- [3] *Medicínální láhiové ventily*. GCE: [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://czech.gcegroup.com/category/medical-cylinder-valves>
- [4] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [5] WRIGHT, R. N. *Relevant Aspects of Copper and Copper Alloy Metallurgy*. 2016, 13, 177-200. ISSN 9780128026502.
- [6] MAZANCOVÁ, E. *Neželezné kovy*. Ostrava 2008. Studijní opora. VŠB-Technická univerzita Ostrava
- [7] SILBERNAGEL, A. *Nauka o materiálu I*. 2. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1996. ISBN 80-7078-116-5.
- [8] FADHIL, A.A., MAGDY S.G., BERLANTY A.I, et al. Structural characterization and detecting processes of defects in leaded brass alloy used for gas valves production. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2018, 57(3), 1301-1311 [cit. 2021-04-23]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2017.04.017
- [9] VETIŠKA, A. *Nauka o materiálu, neželezné kovy a slitiny*. Praha, 1961. :Vysoké učení technické v Brně.
- [10] *The Brasses properties & applications*. 117. Spojené království: Copper Development Association, 1996. Dostupné také z: https://www.nationalbronze.com/pub-117---the-brasses_whole_web-pdf.pdf
- [11] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [12] CHOTĚBORSKÝ, R. *Nauka o materiálu*. V Praze 2011: Česká zemědělská univerzita ISBN 978-80-213-2236-3.
- [13] GREGER, M. *Kování*. Ostrava, 2008. Studijní opora. Vysoká škola báňská-Technická Univerzita Ostrava.
- [14] *Kruhové mosazné tyče, mosaz kulatina* UCB TECHNOMETAL: [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.unibar.cz/mosazne-tyce-kulatina#>

- [15] FELLI, F., A. BROTZU a D. PILONE. Analysis of the fracture criticality of biphasic brass. *Procedia Structural Integrity* [online]. 2016, 2, 2959-2965 [cit. 2021-04-23]. ISSN 24523216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2016.06.370
- [16] PERNIS, R., KASALA, J., PERNIS, I. Surface defects of brass bars. *Metal* [online] 2011, Brno, Czech Republic, EU: Faculty of Special Technology, Slovak Republic [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_11/lists/papers/967.pdf
- [17] FADHIL, A.A., SAMUEL, M., Ahmed M., EL-BAHLOUL, M. Copper-Zinc-Lead Alloys, Common Defects Through Production Stages and Remedy Methods. *The Online Journal of Science and Technology* [online]. Turecko, 2015, 5(2), 17-22 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <http://tojsat.net/journals/tojsat/articles/v05i02/v05i02-02.pdf>
- [18] *Bars for machining and forging*. ALMAG: [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.unibar.cz/mosazne-tyce-kulatina#>
- [19] ELFMARK, J. Tváření kovů. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. Technický průvodce. ISBN 80-03-00651-1.
- [20] KCHAOU, M., RIADH E., YANNICK D. Failure mechanisms of H13 die on relation to the forging process – A case study of brass gas valves. *Engineering Failure Analysis* [online]. 2010, 17(2), 403-415 [cit. 2021-04-23]. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2009.08.015
- [21] HAŠEK, V. *Kování*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1965, 730 s.
- [22] *Pneumaticko-hydraulické buchary*. Šmeral: [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.smeral.cz/cs/product/56/khz-16a>
- [23] *Portál profesionálu strojírenství: CNC fórum*: [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://forum.strojirenstvi.cz/viewtopic.php?t=17607>
- [24] *Strojimport, Maschinen*: [online]. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <http://www.strojimport.cz/maschinen/cys-320/>
- [25] *Současné trendy ve zpracování hořčkových slitin tvářením*, Výroba a technologie. MM průmyslové spektrum: [online]. 12. 10. 2005n. 1. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitin-tvarenim>
- [26] BAUSER, M., SAUER G., SIEGERT K. *Extrusion*. 2nd ed. Materials Park, OH:ASM International, 2006. ISBN 978-087-1708-373.

- [27] FABÍK, R. *Tváření kovů*. Ostrava, 2012. Učební text: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2572-4.
- [28] PŘEPIORA, V. *Tváření neželezných kovů*. Ostrava, 1983. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [29] FABÍK, R. *Modelování tvářecích procesů*. Ostrava, 2013. Studijní opora. Vysoká škola báňská-Technická Univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3362-0
- [30] *Softwary pro výpočty metodou konečných prvků*. Dlubal: [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs/reseni/oblasti-pouziti/software-pro-vypocty-mkp>
- [31] BERAN. J., *Generování sítě konečných prvků*. Modelování a simulace: [online]. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/107772452-Generovani-site-konecnych-prvku.html>
- [32] KAWULOK, P, KAWULOK R. RUSZ S. *Válcování*. Ostrava, 2017. Návod pro cvičení. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [33] Forge. *Transvalor* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.transvalor.com/en/forge>
- [34] Forge®: *Best-in-class simulation software for the forging industry*. Transvalor [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.transvalor.com/en/cmspages/forge-nxt.32.html>
- [35] Program Forge Nxt 1.1: Part 1: Introduction. Transvalor S. A. [cit. 2021-04-18]
- [36] Simufact Forming: *Simulating Forming with Simufact Forming*. Simufact [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/simufactforming-forming-simulation.html>
- [37] Fields of Application Forming. Simufact [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/fields-of-application.html>
- [38] DEFORM-3D: Scientific forming technologies corporation [online]. 2018 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.deform.com/wp-content/uploads/2015/06/DEFORM-3D-Machining.pdf>
- [39] KAPUSTOVÁ, M. LUBINOVÁ M., *Analýza mechanických vlastností a mikrostruktury Cu-Zn zliatin v intervale kovacích teplot. Metal 2006*. Hradec nad Moravicí.